



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA CHEMICKÁ**

FACULTY OF CHEMISTRY

**ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ**

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

**TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES Z  
TERMOPLASTŮ**

TECHNOLOGY OF INJECTION MOLDING OF THERMOPLASTIC TEST SPECIMENS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Yersin Khamzin**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Mgr. František Kučera, Ph.D.**

**BRNO 2021**

## Zadání diplomové práce

Číslo práce: FCH-DIP1587/2020 Akademický rok: 2020/21  
Ústav: Ústav chemie materiálů  
Student: **Bc. Yersin Khamzin**  
Studijní program: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů  
Studijní obor: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů  
Vedoucí práce: **Mgr. František Kučera, Ph.D.**

### Název diplomové práce:

Technologie vstřikování zkušebních těles z termoplastů

### Zadání diplomové práce:

Literární rešerše – teorie pro injekční vstřikování termoplastů se zaměřením na technologické parametry ovlivňující vlastnosti výlisků

Experimentální část – optimalizace technologických parametrů IM procesu vybraných polymerů pro výrobu zkušebních těles dogbone 1A

Shrnutí výsledků a závěr

Diskuze

Závěr

### Termín odevzdání diplomové práce: 28.5.2021:

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí diplomové práce.

-----  
Bc. Yersin Khamzin  
student(ka)

-----  
Mgr. František Kučera, Ph.D.  
vedoucí práce

-----  
doc. Ing. František Šoukal, Ph.D.  
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2021

-----  
prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.  
děkan

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá optimalizací technologických parametrů injekčního vstřikování plastů a studiem vlivu technologických parametrů na kvalitu vylisovaných zkušebních tělísek typu 1A. V práci byla hodnocena z hlediska rozměrové stálosti a hmotnosti kvalita výlisků pro 3 typy polypropylenu (PP) s rozdílným indexem toku taveniny (Mosten GB 002, Mosten GB 218, Mosten MA 230) a 1 typ polystyrenu (PS) (Krasten PS GP 154). V práci byl zhodnocen přínos softwaru pro modelování procesu injekčního vstřikování plastů. Pro optimalizaci technologických parametrů byl použit software SOLIDWORKS Plastics. Konstrukce tělísek, formy a systému chlazení byla vykonstruována a na základě parametrů získaných ze simulace procesu vstřikování byla vyrobena zkušební tělíska. Jejich parametry kvality byly porovnány s 3D modelem a pro každý ze studovaných materiálů byly z hlediska kvality vybrány optimální technologické parametry a vyhodnocena míra vlivu jednotlivých parametrů vstřikování na kvalitu výlisků. Byla prokázána shoda výsledků teoretické simulace s reálným experimentem a byl vypracován výpočetní modul nezávislý na optimalizovaných parametrech kvality, obecně vhodný pro optimalizaci parametrů kvality vstřikovaných dílů.

## **Klíčová slova**

Injekční vstřikování, vstřikolis, polypropylen, polystyren, simulace vstřikování, kvalita vstřikovaných dílů, smrštění, zkušební tělíska, forma pro vstřikování, teplota formy, vstřikovací rychlost, vstřikovací tlak, dotlak, bod přepnutí, doba dotlaku, doba chlazení.

## **Abstract**

The diploma thesis focuses on the optimization of technological parameters of plastic injection molding and the study of the influence of technological parameters on the quality of molded test specimens' type 1A. The quality of molded parts for 3 types of polypropylene (PP) with different melt flow rate (Mosten GB 002, Mosten GB 218, Mosten MA 230) and 1 type of polystyrene (PS) (Krasten PS GP 154) was evaluated in terms of dimensional stability and weight. The contribution of software for modeling the plastic injection molding process was evaluated in this work. SOLIDWORKS Plastics software was used to optimize technological parameters. The construction of the bodies, mold and cooling system was constructed, and test bodies were produced on the basis of parameters obtained from the simulation of the injection molding process. Their quality parameters were compared with a 3D model and for each of the studied materials the optimal technological parameters were selected in terms of quality and the degree of influence of individual injection parameters on the quality of moldings was evaluated. The accordance of the results of the theoretical simulation with the real experiment was proved and a computational module independent of the optimized quality parameters, generally suitable for optimizing the quality parameters of the injected parts, was developed.

## **Keywords**

Injection molding, injection molding machine, polypropylene, polystyrene, injection molding simulation, injected parts quality, shrinkage, test specimen, injection mold, mold temperature, injection rate, injection pressure, holding pressure, switching point, holding time, cooling time.

## Bibliografická citace

KHAMZIN, Yersin. *Technologie vstřikování zkušebních těles z termoplastů*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131769>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce František Kučera.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

V Brně 25. května 2021

.....

podpis studenta

## Poděkování

Děkuji svému vedoucímu Mgr. Františku Kučerovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky k práci. Děkuji Ing. Miroslavu Černému, Ph.D. za pomoc při práci s technickým zařízením laboratoře.

# OBSAH

1	ÚVOD.....	8
2	CÍL PRÁCE.....	10
3	TEORETICKÁ ČÁST .....	11
3.1	Injekční vstřikování.....	11
3.2	Princip procesu injekčního vstřikování.....	11
3.2.1	Vstřikovací stroje .....	11
3.2.2	Formy pro vstřikování .....	14
3.2.3	Vstřikovací cyklus .....	16
3.2.4	Popis vstřikovacího cyklu pomocí $p$ - $t$ a $p$ - $v$ - $T$ diagramů.....	17
3.3	Charakteristika plastů zpracovávaných injekčním vstřikováním.....	18
3.3.1	Nadmolekulární struktura plastů .....	19
3.3.2	Vliv krystalinity na smrštění plastů.....	21
3.3.3	Vlastnosti a aplikace materiálů použitých pro vstřikování .....	21
3.4	Vliv technologických parametrů procesu na kvalitu výrobků .....	24
3.4.1	Význam kvality v procesu vstřikování.....	25
3.4.2	Vady výrobků a vliv technologických parametrů .....	25
3.4.3	Vliv orientačních jevů na kvalitu výrobků .....	28
3.5	Využití softwaru ke zvýšení kvality vstřikovaných dílů.....	29
3.5.1	Metody optimalizace procesu vstřikování.....	29
3.5.2	Využití SOLIDWORKS Plastics pro modelování procesu vstřikování .....	32
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	33
4.1	Charakteristika materiálů použitých pro vstřikování .....	33
4.2	Charakteristika vstřikovacího stroje.....	35
4.3	Konstrukce zkušebních těles podle normy ČSN EN ISO 527-2.....	36
4.4	Algoritmus optimalizace technologických parametrů vstřikování .....	37
4.4.1	Sledované parametry kvality zkušebních tělísku .....	37
4.4.2	Výběr technologických parametrů vstřikování .....	39
4.4.3	Sestrojení ortogonálního pole technologických parametrů .....	40
4.5	Simulace procesu vstřikování v SOLIDWORKS Plastics .....	43

4.5.1	Vytvoření objemové sítě .....	44
4.5.2	Provedení simulace vstřikování.....	46
4.6	Ověření teoretického modelu praktickým vstřikováním.....	48
4.7	Analýza propadlin na zkušebním tělísku .....	50
5	VÝSLEDKY A DISKUZE.....	51
5.1	Optimalizace technologických parametrů.....	51
5.1.1	Výsledky simulace a reálného experimentu .....	51
5.1.2	Numerické zpracování naměřených dat z reálného vstřikování.....	53
5.1.3	Výpočet relačních koeficientů a relační třídy.....	56
5.1.4	Kvantifikace vlivu změny technologických parametrů na kvalitu výrobku, Mosten GB 002.....	59
5.1.5	Kvantifikace vlivu změny technologických parametrů na kvalitu výrobku, Mosten GB 218.....	65
5.1.6	Kvantifikace vlivu změny technologických parametrů na kvalitu výrobku, Mosten MA 230.....	70
5.1.7	Kvantifikace vlivu změny technologických parametrů na kvalitu výrobku, Krasten PS GP 154 .....	75
5.2	Výsledky analýzy propadlin na zkušebním tělísku.....	80
6	ZÁVĚR.....	83
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	85
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	90
	SEZNAM PŘÍLOH.....	92
	PŘÍLOHY .....	94

# 1 ÚVOD

Jednou z výzev pro většinu průmyslových odvětví je výroba složitých dílů. Při překonávání takových výzev je jednou z vhodných metod výroba forem, která umožňuje vyrábět více než 70 % dílů. Vstřikování plastů, které se v průmyslovém měřítku používá již více než 70 let, je jednou z nejvýznamnějších operací zpracování plastu, kterou se průmyslově vyrábí přibližně jedna třetina všech plastových výrobků. Proces umožňuje vyrábět plastové díly složitých tvarů a přináší potenciální výhody díky zkrácení potřebných dob na návrh, výrobu a možnosti rychlých konstrukčních změn [1].

Plastové výrobky se vyrábějí v široké škále: od jednorázových nádobí do sofistikovaných produktů, jako protézy kyčelních a kolenních kloubů. Jedním z důvodů enormní popularity plastů v nejrůznějších průmyslových aplikacích je obrovská škála vlastností, které plasty vykazují, a snadné zpracování [2].

Pro výrobu kvalitních plastových dílů je třeba optimalizovat parametry procesu, např. vstřikovací tlak a dotlak, teplota formy, doba dotlaku, doba chlazení atd. Tyto parametry mají přímý vliv na kvalitu a cenu výrobků. Optimalizace parametrů procesu je však složitá úloha, např. zvýšení teploty vstřikování způsobí snížení viskozity taveniny, což má za následek snížený tlak v dutině. Na druhé straně vysoká teplota vstřikování zvyšuje dobu chlazení, což snižuje produktivitu procesu. Vysoká teplota formy prodlužuje dobu chlazení. Příliš krátká doba vstřikování zvyšuje tlak v dutině. Naopak dlouhá doba vstřikování vede ke zvýšení viskozity taveniny. Je zřejmé, že pro zajištění kvality výrobků a snížení nákladů se musí optimalizační algoritmus uvedených protichůdných parametrů vstřikovacího procesu měnit i v závislosti na vybraném materiálu výrobku [3].

V současné době jsou inženýrské projekty schopné zaručit vysokou přesnost procesu injekčního vstřikování zejména díky dostupnosti výpočetních nástrojů schopných simulovat proces vstřikování plastů. Použití Computer Aided Engineering (CAE) může vést k výsledkům, které významně přispívají ke kvalitě procesu vstřikování plastů. Výpočtová analýza je strategií, která je stále více přijímána a aplikována průmysly zpracovávajícími plasty v předvýrobní fázi. Výpočtová simulace vstřikovacích procesů je nástroj, který lze použít k identifikaci a opravě chyb ve vstřikování, snížení nákladů výroby a k zahrnutí nových charakteristik produktu ve fázi projektování. Tímto způsobem mohou návrháři vyvinout nové způsoby výroby vstřikovacích



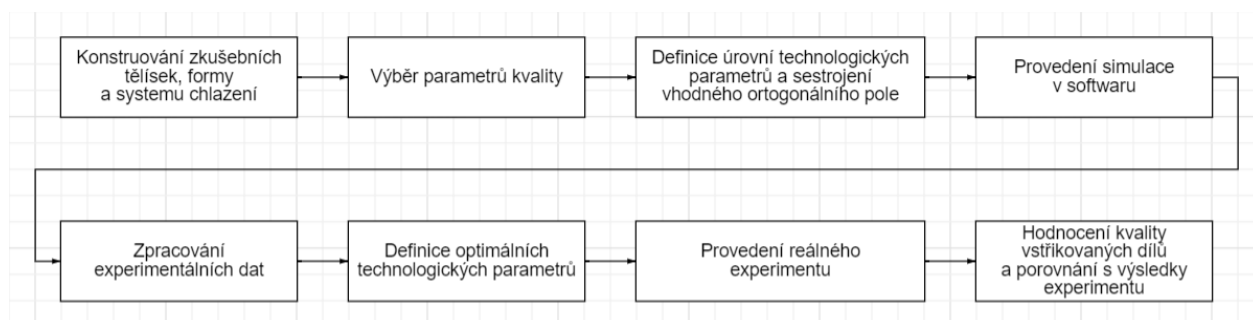
forem s extrémně vysokou přesností. Numerická simulace procesu plnění při vstřikování je cenným nástrojem pro projektanta pro předvídání potenciálních vad a optimalizaci procesu. Inženýři mohou virtuálně vyhodnotit alternativní materiály, aniž by fyzicky použili skutečný materiál, a zkrátit čas přípravy výroby. Zejména je možné snížit riziko chyb při výrobě formy, vyhnout se problémům se vstřikováním a minimalizovat výrobní náklady. Simulace jsou užitečné pro optimalizaci návrhu formy a parametrů zpracování, což vede k lepší kvalitě procesů a produktů. I když jsou to značné výhody, výpočetní simulaci využívá jen několik společností v oblasti zpracování plastů a výroby forem. Jedním z faktorů, který brání širokému šíření výpočetní simulace v takových průmyslových odvětvích, jsou náklady na softwarovou licenci. Čím přesnější jsou požadované výsledky simulace, tím dražší je software a složitější je nastavení fyziky problému [4].

Nejpoužívanějšími materiály pro vstřikování jsou termoplasty. Materiály, jako vysokohustotní polyetylén (HDPE), nízkohustotní polyetylen (LDPE) a polypropylen (PP), jsou ve vstřikovacím procesu nejpoužívanějšími materiály pro výrobu velkoobjemového spotřebního zboží. Mezi frekventovaně používané plasty patří i skupina polystyrenových (PS) plastů [5].

## 2 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je optimalizace procesu výroby zkušebních těles z termoplastů v místních podmínkách na vstřikolisu Arburg 320 C a dvoukavitovou formou na zkušební tělesa typu 1A se zaměřením na zkvalitnění procesu.

K splnění cíle práce byly provedeny dílčí kroky, které jsou uvedeny na obrázku 1.



Obr. 1: Algoritmus optimalizace technologických parametrů vstřikování

Algoritmus optimalizace technologických parametrů vstřikování z obrázku 1 byl podrobněji popsán v experimentální části diplomové práce.

## **3 TEORETICKÁ ČÁST**

### **3.1 Injekční vstřikování**

Vstřikování nebo injekční vstřikování je proces pro výrobu dílů vstřikováním polymerní taveniny do formy a následným chlazením ve formě. Vstřikování lze provádět s řadou materiálů, např. s kovy (die casting nebo lití pod tlakem), skly, elastomery. Nejčastěji používanými materiály pro proces injekčního vstřikování jsou termoplastické polymery.

Pro výrobu produktů metodou injekčního vstřikování musí být zpracován návrh produktu. Proces vstřikování se usnadňuje zvýšením přesnosti navržených produktu a forem, přitom se uvažují především vlastnosti a požadovaný tvar plastového výrobku a kovové formy, použitý materiál výrobku a formy, vlastnosti vstřikovacího stroje a další parametry. Vstřikování plastů je široce používáno pro výrobu různých dílů, od nejmenších komponentů až po celé panely pro automobily [6].

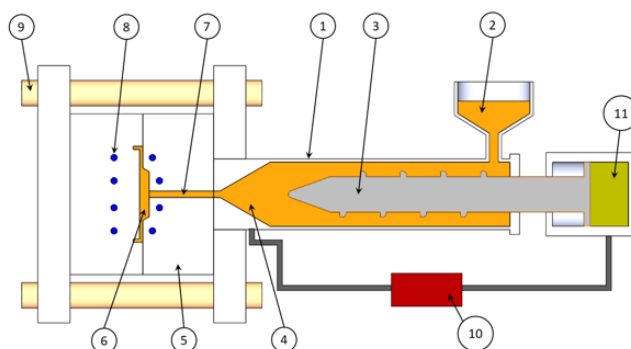
### **3.2 Princip procesu injekčního vstřikování**

#### **3.2.1 Vstřikovací stroje**

Dva nejpobulárnější typy vstřikovacích strojů neboli vstřikolisů jsou stroje pro jednokomponentní a dvoukomponentní vstřikování. Podle typu pohonu se vstřikolisy dělí na hydraulické, elektrické a hybridní.

Vstřikolisy mají 3 základní části: vstřikovací jednotku, formu a uzavírací jednotku. Ve vstřikovací jednotce (nazývané také plastifikační jednotka) se připravuje polymerní tavenina, která se dále vstřikuje do formy. Dalšími úkoly vstřikovací jednotky jsou samotné vstřikování a dotlak. Pomocí uzavírací jednotky se forma zavírá a otevírá, zajišťuje se udržení formy v zavřeném stavu během vstřikování, dotlaku a vyhození výrobku. Vstřikovací a uzavírací jednotky jsou řízeny řídicí mikroprocesorovou jednotkou [7].

Základní části vstříkolisu jsou uvedeny na obrázku 2.



Obr. 2: Základní části vstříkolisu: 1 – jednotka vstřikování, 2 – násypka, 3 – šnek, 4 – tryska, 5 – forma, 6 – dutina, 7 – vtoková soustava, 8 – chladicí kanály, 9 – upínací jednotka, 10 – řídicí jednotka, 11 – hydraulická jednotka [7]

Podrobnější popis funkcí jednotlivých součástí vstříkolisu uvedených na obrázku 2 je uveden v tabulce 1.

Tabulka 1: Popis funkcí jednotlivých součástí vstříkolisu [7]

Číslo	Součásti vstříkolisu	Funkce
1	Jednotka vstřikování	Přijímá plastové granule z násypky (2) a transportuje je do horkého válce, který obsahuje rotující šnek (3) a trysku (4).
2	Násypka	Slouží k dávkování plastového granulátu.
3	Šnek	Zahřívá a transportuje taveninu přes válec.
4	Tryska	Jakmile jednotka vstřikování (1) vyprodukuje potřebné množství taveniny, šnek (3) vstřikuje roztavený plast přes trysku do formy (5).
5	Forma	Formuje dutinu (6), obsahuje vtokový systém (7), systém chlazení (8), vyhazovače a pohyblivou a stacionární desku.
6	Dutina	Dutina se vyplňuje taveninou, která zchladne a vytvoří vyrobený díl.
7	Vtoková soustava	Vtokovou soustavou teče tavenina do dutiny.
8	Chladicí kanály	Chladicí kanály odvádějí teplo z formy. V chladicím systému lze používat vodu nebo jiné chladivo, např. etylenglykol.
9	Upínací jednotka	Používá motor k otevření a zavření formy a brání otevření formy během procesu vstřikování.
10	Řídicí jednotka	Monitoruje a řídí procesní parametry jako např. teplota, vstřikovací tlak, poloha šneku, vstřikovací rychlost.
11	Hydraulická jednotka	Příspěvuje a udržuje hydraulický tlak.

Mezi významné charakteristiky vstřikovacích strojů patří plastifikační kapacita a uzavírací síla. Plastifikační kapacita je maximální hmotnost plastu, který lze ve stroji roztavit a zhomogenizovat za jednotku času [kg/hod].

Uzavírací síla znamená sílu, která během vstřikování a dotlaku drží formu v uzavřeném stavu. Uzavírací síla  $F_U$  [kN] se vypočítá podle rovnice 3.2.1.1.

$$F_U \text{ [kN]} = \frac{1}{100} \cdot S \text{ [cm}^2\text{]} \cdot p_i \text{ [bar]} \quad (3.2.1.1)$$

kde  $S$  je plocha výrobku,  $p_i$  je tlak v dutině formy.

Moderní vstřikolis je vhodný k provádění flexibilních procesů, ale k zajištění potřebného stupně flexibility je nezbytná celá řada periferních pomocných zařízení. Mezi periferní zařízení patří:

- zařízení pro sušení granulátu;
- dopravní systémy pro suroviny;
- zařízení pro přepravu forem;
- zařízení pro předehřívání forem;
- zařízení pro výměnu forem;
- zařízení pro výměnu plastifikační jednotky a šneku;
- zařízení pro manipulaci s výrobky, např. roboty s výměnnými rameny pro přizpůsobení různým typům výroby;
- dopravní systémy pro hotové výrobky a manipulační zařízení k přepravě výrobků do dalších výrobních fází;
- kontrolní zařízení [7].

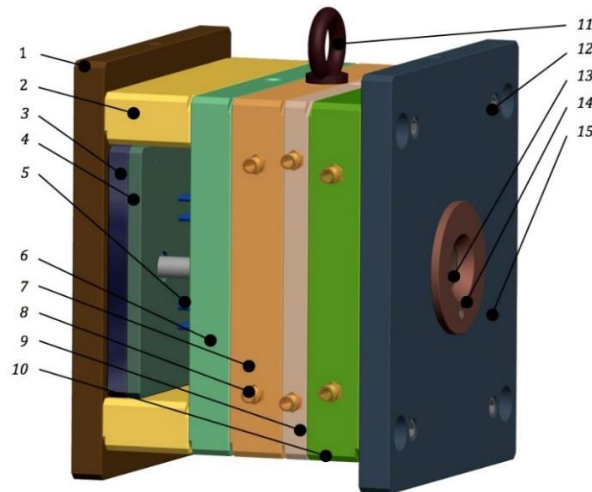
### 3.2.2 Formy pro vstřikování

Po výběru vhodného designu produktu a výběru materiálu je třeba definovat návrh formy, což je hlavní část přípravy procesu vstřikování. Forma má za úkol minimalizovat možné vady dílů. Existuje mnoho parametrů návrhu formy, např. typ a tvar vtoků a další konstrukční vlastnosti nástrojů pro formy. Nevhodný návrh forem a jejich součástí vede k defektům plastových výrobků.

Některými důležitými principy při navrhování forem jsou:

- schopnost formy odolávat tlakům během vstřikování, přičemž jak cyklickému vstřikovacímu tlaku (vnitřní), tak upínací síle (vnější);
- snadnost proudění polymerní taveniny;
- návrh formy musí umožňovat snadné odvzdušnění a přenos tepla pro přesnější teplotu;
- rozměry dutiny musí být dimenzovány tak, aby bylo zohledněno smrštění výrobků [7].

Vlastnosti konečného produktu ovlivňuje hodně faktorů formy, např. tvar dutiny, tvar vtoků, dělicí rovina, odvzdušňovací kanály, přesnost návrhu a výroby forem. Základní části možného návrhu formy pro vstřikování jsou uvedeny na obrázku 3.



Obr. 3: Základní části formy pro vstřikování: 1 – upínací deska pohyblivé části vstřikovací formy, 2 – rozpěra, 3 – hlavní vyhazovací deska, 4 – přídržovací vyhazovací deska, 5 – vyhazovač, 6 – podpěrná deska, 7, 9, 10 – desky, 8 – systém chlazení, 11 – manipulační oko, 12 – hlavní montážní šrouby, 13 – vtoková vložka, 14 – středící kroužek pevné části vstřikovací formy, 15 – upínací deska pevné části vstřikovací formy [8]

Přehled uvedených faktorů a jejich vliv na kvalitu výrobků jsou uvedeny v tabulce 2. Značné množství času a náročnost při výrobě formy se objasňuje nutností zohlednit velkou škálu uvedených faktorů [9].

Tabulka 2: Přehled faktorů při návrhu forem a jejich vliv na kvalitu výrobků [9]

<b>Faktor</b>	<b>Možné problémy</b>
Nesprávné umístění vtoku	Studené spoje, proudění, vzduchové kapsy, problémy s odvětráním, propadliny, koncentrace napětí, zkroucení.
Příliš úzké vtokové kanály	Krátké výstřiky, přehřátí plastů, předčasné zamrznutí vtoků, stopy, propadliny.
Příliš velké vtokové kanály	Delší cyklus, zbytky plastu.
Nerovnoměrné rozložení dutin ve formách s více dutinami	Nerovnoměrný nárůst tlaku ve formě, zkreslení formy, rozměrové rozdíly výrobků, špatné vyhazování výrobků, dieselekt, napětí ve výrobku.
Nerovnoměrné chlazení formy	Delší vstřikovací cyklus, vysoké smrštění, pnutí (deformace), špatné vyhazování výrobků, zkreslení součástí během vyhazování.
Nesprávné odvětrání dutiny	Potřeba vyššího vstřikovacího tlaku, spáleniny na povrchu (hnědé pruhy), špatné vyhazování výrobků, krátké výstřiky, tokové čáry.
Nesprávný systém vyhazování nebo umístění vyhazovačů	Špatné vyhazování výrobků, zkreslení nebo poškození výrobků, delší vstřikovací cyklus.
Příliš široké ústí vtoku	Špatné vyhazování výrobků, vyšší vstřikovací tlak, opotřebení formy.
Příliš dlouhé ústí vtoku	Špatné vyhazování výrobků, tlakové ztráty, delší vstřikovací cyklus, předčasné zamrznutí vtoků.
Špatné vyrovnaní jader a dalších součástí formy	Zkreslení součástí, vzduchové kapsy, odchylky v rozměrech, nerovnoměrné napětí, špatné vyhazování výrobků.
Pohyb formy kvůli její nedostatečné podpoře	Spáleniny, odchylky v rozměrech, špatné vyhazování výrobků, tlakové ztráty.
Příliš malý poloměr vtokové vložky	Unik plastu, špatné vyhazování výrobků, tlakové ztráty.
Forma a šnek nejsou vyrovnány	Špatné vyhazování výrobků, unik plastu, vyšší zpětný tlak, tlakové ztráty.

### 3.2.3 Vstřikovací cyklus

Proces vstřikování se skládá ze tří paralelních dílčích procesů, konkrétně tavení polymerního materiálu, vstřikování a chlazení. Obecně lze proces vstřikování rozdělit na následující fáze:

- plastifikace (příprava taveniny, vliv otáček a odporu šneku na kvalitu taveniny);
- vstřikování (naplnění tvarové dutiny formy taveninou; vstřikovací rychlost, vstřikovací tlak, bod přepnutí);
- dotlak (velikost a profil dotlaku, materiálový polštář);
- chlazení (od počátku vstřiku do zamrznutí vtoku);
- vyhození (vybrání výlisku) [9].

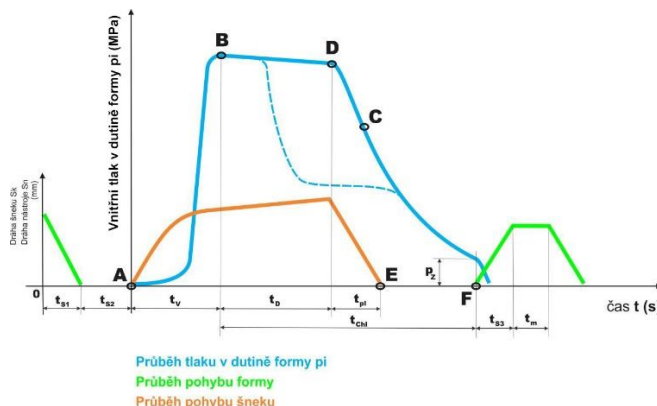
Polymerní granulát z násypky se v plastikační komoře roztaví a rotujícím šnekem se řízený objem taveniny vstřikuje pod tlakem z plastikační komory do formy s řízenou teplotou. Jako zdroj tepla pro tavení se využívá jak topení, tak účinek tření taveniny o šnek. Formy se vyrábějí z kovů, obvykle buď z oceli, nebo z hliníku. Forma se uzavře, roztavený polymer se vstřikuje do formy a tlak se udržuje. Fáze dotlaku slouží pro zabránění zpětnému toku taveniny a ke snížení rozměrových změn výrobků. Vstříknutá tavenina poté ztuhne ve formě za vzniku produktu, zatímco šnek se otáčí a pohybuje se zpět pro vytvoření a dopravu taveniny k formě pro další výstřik. Nakonec se forma otevře a pevný produkt se odstraňuje z dutiny. Uzavřením formy začíná další cyklus vstřikování. Jednotlivé fáze procesu vstřikování jsou velmi krátké. Celý proces vstřikování obvykle trvá od několika sekund do 2 minut [10], nicméně u rozměrných dílů s větší tloušťkou stěny řádově až desítky minut.



### 3.2.4 Popis vstřikovacího cyklu pomocí $p_i-t$ a $p-v-T$ diagramů

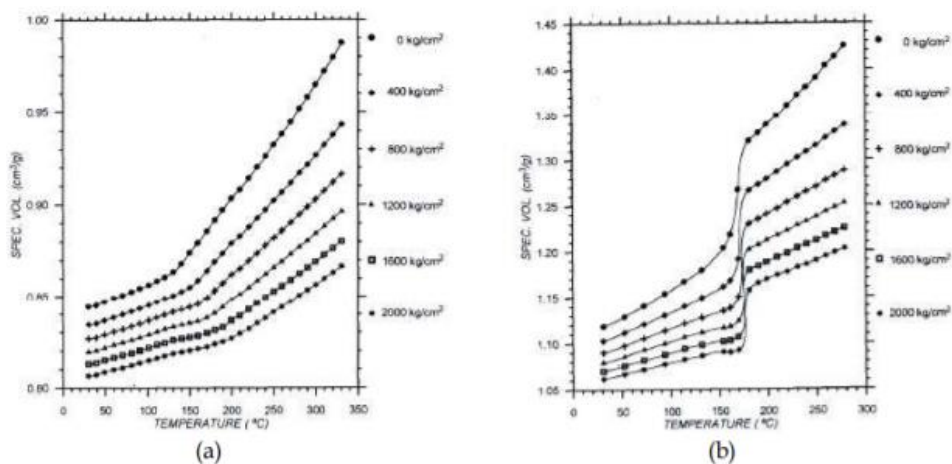
Obecně existují dva způsoby popisu vstřikovacího cyklu: pomocí hodnot vstřikovacího tlaku (resp. jeho časového průběhu) nebo pomocí  $p-v-T$  diagramu.

Příklad časového průběhu tlaku v dutině formy je uveden na obrázku 4.



Obr. 4: Příklad časového průběhu tlaku v dutině formy:  $t_{s1}$  – čas na zavření vstřikovací formy,  $t_{s2}$  – čas přisunutí a odsunutí vstřikovací jednotky,  $t_v$  – doba vstřikování,  $t_{ch}$  – doba chlazení,  $t_d$  – doba dotlaku,  $t_{pl}$  – doba plastikace,  $t_m$  – manipulační doba,  $t_{s3}$  – čas na otevření vstřikovací formy [11]

Vlastnosti  $p$ ,  $v$ ,  $T$  polymerů jsou důležité jak pro inženýrství, tak pro fyziku polymerů. Obrázek 5 ukazuje typické  $p-v-T$  diagramy amorfního a semikrystalického polymeru.



Obr. 5: Příklady  $p-v-T$  diagramu pro amorfní (a) a semikrystalické (b) termoplasty [12]

$p-v-T$  diagram popisuje konkrétní objem materiálu jako funkci tlaku a teploty. Specifický objem se zvyšuje s růstem teploty. V polymeru dochází k tepelnému přechodu, který je známý jako jeho teplota skelného přechodu,  $T_g$ . Protože  $T_g$  není ostrým přechodem, hodnoty pod a nad  $T_g$  budou vykazovat rozmezí teplot, které je obecně přijímáno jako  $T_g$ . Jak je znázorněno na obrázku 5,

semikrystalický polymer vykazuje jinou tepelnou odezvu než amorfní polymer. U amorfního polymeru je  $T_g$  jasně vidět jako teplota, při které polymer přechází ze sklovitého do kaučukovitého stavu. Rychlost změny s přírůstkem teploty je mnohem menší ve sklovitém stavu než v kaučukovitém. Naproti tomu semikrystalický polymer obsahuje dostatečnou krystalinitu k udržení strukturní kontinuity nad  $T_g$  [12].

V procesu vstřikování některé vady, např. smrštění, deformace a propadliny, způsobují tepelně vyvolané napětí, a mohou ovlivnit jak rozměrovou přesnost, tak dlouhodobou rozměrovou stabilitu. Pomocí softwaru pro simulaci vstřikování plastů lze snížit riziko výskytu smrštění nebo deformací v plastových dílech poskytnutím kvantitativních předpovědí.

### **3.3 Charakteristika plastů zpracovávaných injekčním vstřikováním**

Typ výroby a přijatý proces závisí na vlastnostech polymeru, na tvaru a formě konečného produktu. Polymerní materiály jsou nejčastěji polymery smíchané s aditivy. Existuje velmi široká řada různých polymerů, ale při navrhování nebo výrobě polymerních produktu se lze řídit základními přístupy. V široké klasifikaci plastů existují dvě kategorie: termoplasty a termosety.

Termoplasty se skládají z dlouhých molekul polymeru, z nichž každá může mít postranní řetězce nebo skupiny, které nejsou spojeny s jinými molekulami polymeru (tj. nejsou zesíťované). Termoplasty se obvykle vyrábějí jako granulovaný polymer. Během procesu tvarování termoplastů obvykle nedochází k chemickým změnám.

V termosetech během procesu výroby formují reaktivní skupiny příčné vazby mezi molekulami. Zesíťovaný nebo vytvrzený materiál nelze ohřátím změkčit. Termosety se obvykle dodávají jako částečně polymerovaná formovací hmota nebo jako kapalná směs monomer polymer. V nevytvrzeném stavu mohou být tvarovány tlakem nebo bez tlaku a polymerizovány do vytvrzeného stavu pomocí chemikálií nebo tepla.

Většina literatury o vstřikování se zcela nebo primárně týká termoplastů a velmi málo se z tohoto hlediska popisují termosety. Je to dané tím, že minimálně 90 % hmotnosti všech plastů zpracovávaných injekčním vstřikováním jsou termoplasty [9].

### 3.3.1 Nadmolekulární struktura plastů

Termín morfologie znamená studium formy, kde forma znamená tvar a uspořádání částí objektu.

U polymerů morfologie označuje:

- krystalinitu, což je relativní objem obsazený každou z fází;
- rozměry, tvar, distribuci a orientaci krystalitů;
- orientaci amorfní fáze a plniva (pokud existují).

Rozmanitost vlastností plastů (mechanických, optických, elektrických, transportních, chemických) se odvíjí nejen od chemické struktury molekul, ale také od mikrostruktury a morfologie. Např. krystalinita má výrazný účinek na mechanické vlastnosti materiálu, protože krystaly jsou obecně tužší než amorfní materiál a např. orientace vyvolává anizotropii a další změny mechanických vlastností.

Amorfní termoplasty mají různé molekuly, které se pohybují různými směry (náhodná konfigurace). Mezi příklady patří PS, polymethylmethakrylát (PMMA), akrylonitrilbutadienstyren (ABS), polykarbonát (PC) a polyvinylchlorid (PVC). Polymerní molekuly, které se mohou naskládat blíže k sobě, s větší pravděpodobností vytvoří krystalické struktury, ve kterých se molekuly vyrovnají v nějakém uspořádaném tvaru. Příklady krystalických termoplastů zahrnují PP, polyetylen (PE), polyamid (PA), polytetrafluorethylen (PTFE), polyethylentereftalát (PET), polybutylentereftalát (PBT) a polyoxymethylen (POM).

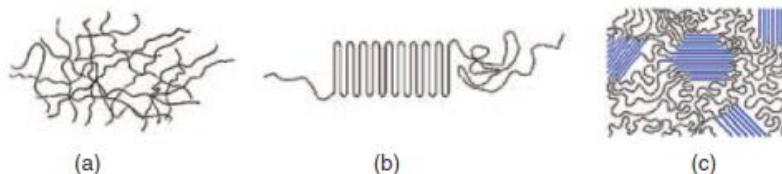
Krystalizovaná oblast polymerů je tužší, zatímco nekystalizovaná amorfní oblast je pružnější. S růstem krystalinity dochází k dalším účinkům. U PE existuje zvýšená odolnost proti tečení, teple a praskání napětím, stejně jako zvýšené smrštění výrobků. Obecně platí, že semikrystalické typy plastů jsou náročnější na zpracování, vykazují větší objemové změny a tendenci se během zpracování smršťovat a deformovat více než amorfní typy. Semikrystalické polymery mají i relativně ostrý bod tání. Amorfní plasty při zahřívání měknou postupně.

V tabulce 3 jsou porovnány základní rozdíly krystalických a amorfních polymerů.

Tabulka 3: Porovnání základních rozdílů krystalických a amorfních polymerů [9]

<b>Semikrystalické polymery</b>	<b>Amorfní polymery</b>
Vyšší hustota	Nižší hustota
Vyšší modul a pevnost v tahu	Nižší modul a pevnost v tahu
Vyšší smrštění	Nižší smrštění
Vyšší tažnost	Nižší tažnost
Vyšší viskozita	Nižší viskozita
Ostrý bod tání	Široký rozsah měknutí
Obvykle neprůhledné	Obvykle průhledné
Vyšší účinek orientace	Nižší účinek orientace
Vyšší chemická odolnost	Nižší chemická odolnost

Reálné semikrystalické polymery obsahují až 20 % amorfní fáze. Popsané struktury polymerů jsou zobrazeny na obrázku 6.



Obr. 6: Struktura polymerů: (a) amorfní, (b) krystalická a (c) semikrystalická [9]

Podmínky procesu chlazení ovlivňují morfologii plastů. Např. pokud se semikrystalické termoplasty extrémně rychle zchladí, výsledkem je úplný (nebo mnohem více) amorfní pevný stav. Jeho vlastnosti se mohou výrazně lišit od vlastností pomalu ochlazovaných materiálů. Účinky času jsou podobné účinkům teploty v tom smyslu, že jakýkoliv plast má rovnovážnou strukturu, ale není však schopen se do této struktury přeskládat okamžitě nebo alespoň v krátké době. Pokud dostanou dostatek času, molekuly se přestaví do svého preferovaného tvaru. Zahřívání tento efekt urychluje. Během tohoto efektu může ve zpracovaných plastech dojít k výraznému smrštění a změnám vlastností [9] i mimo tvarovou dutinu formy.

### 3.3.2 Vliv krystalinity na smrštění plastů

Smrštění polymerů je klíčovým faktorem kvality výrobků. Termoplasty podléhají významné expanzi a kontrakci během procesu vstřikování. Velikost smrštění tj. rozměrových změn je ovlivněna zvoleným typem polymeru. Když se semikrystalické polymery ochladí pod jejich teplotu tání, molekuly v krystalické fázi se uspořádávají lépe, což znamená, že zaujmají menší objem, než kdyby byly amorfni. Hodnota smrštění u semikrystalických polymerů je proto větší než u amorfni. Typické hodnoty smrštění pro amorfni materiál jsou typicky v oblasti 0,4 % až 0,7 %, zatímco u semikrystalických polymerů se mohou pohybovat v rozmezí od 1,0 % do 3,0 %. Smrštění se ovlivňuje nejen nadmolekulární strukturou materiálu, ale také podmínkami zpracování [9].

### 3.3.3 Vlastnosti a aplikace materiálů použitých pro vstřikování

PP je druhým nejčastěji vyráběným komoditním plastem (po PE). V roce 2019 měl globální trh PP hodnotu 126,03 miliardy \$ [13].

PP je v mnoha aspektech podobný PE, zejména pokud jde o chování roztoku a elektrické vlastnosti. Methylová skupina zlepšuje mechanické vlastnosti a tepelnou odolnost, i když chemická odolnost klesá. Vlastnosti PP závisí na molekulové hmotnosti a distribuci molekulové hmotnosti, krystalinitě, typu a podílu komonomeru (pokud je použit) a izotakticitě. Např. v izotaktickém PP jsou methylové skupiny orientovány na jedné straně uhlíkového hlavního řetězce, což podporuje větší stupeň krystalinity a vede k tužšímu materiálu, který je odolnější vůči tečení než ataktický PP a PE [14].

PP je komoditní plast s nízkou hustotou (mezi 0,895 a 0,92 g/cm<sup>3</sup>), tedy lze z PP vyrábět výlisky s nižší hmotností. Na rozdíl od PE se krystalické a amorfni oblasti liší svou hustotou nepatrně. Hustota PE se však může významně měnit pomocí plniv. Youngův modul PP leží mezi 1300 a 1800 N/mm<sup>2</sup>. PP má dobrou odolnost proti únavě [15].

Index toku taveniny (ITT) je prostřednictvím viskozity taveniny měřítkem molekulové hmotnosti polymerů. ITT určuje, jak snadno bude polymerní tavenina proudit během zpracování. PP s vyšším ITT vyplní formu snadněji během procesu vstřikování nebo vyfukování. S růstem ITT se budou snižovat některé fyzikální vlastnosti, např. rázová houževnatost.

Nejběžnější technikou tvarování PP je vstřikování, které se používá u dílů, např. kelímky, šálky, přístroje, lahvičky, víčka, nádoby, domácí potřeby a automobilové díly. Používají se související

techniky vyfukování, které zahrnuje extruzi a vstřikování. Velké množství možností použití výrobků z PP existuje díky možnostem vyrábět díly se specifickými vlastnostmi a přísadami. Např. lze přidat antistatické přísady, které přispívají odolnosti vůči prachu a nečistotám [15].

PP je široce používán v různých aplikacích díky své dobré chemické odolnosti a možnostem jeho svařování. Některá běžná použití PP zahrnují:

- obaly: díky dobrým bariérovým vlastnostem, vysoké pevnosti, dobré povrchové úpravě a nízké ceně;
- spotřební zboží: PP se používá ve výrobě spotřebního zboží, např. domácích potřeb, nábytku, zavazadel, hraček atd.;
- automobilové aplikace: díky nízkým nákladům, vynikajícím mechanickým vlastnostem a tvarovatelnosti je PP široce používán v automobilových součástech, např. mezi hlavní aplikace patří pouzdra na baterie, nárazníky, elementy interiéru, přístrojové desky a obložení dveří;
- vlákna a tkaniny: PP vlákno se používá v celé řadě aplikací, např. fólie, pásy, střížové vlákno atd.;
- lékařské aplikace: PP se používá v různých lékařských aplikacích kvůli vysoké chemické a bakteriální odolnosti a mezi aplikace patří jednorázové injekční stříkačky (nejčastější lékařská aplikace PP), lékařské lahvičky, diagnostické přístroje, Petriho misky, lahvičky na vzorky, misky na jídlo, pánve, nádoby na pilulky atd.;
- průmyslové aplikace: PP se v průmyslovém sektoru široce používá k výrobě nádrží, plechů, trubek atd., a to díky svým vlastnostem, např. vysoká pevnost v tahu, odolnost vůči vysokým teplotám a odolnost proti korozi [16].

Vlastnosti PS jsou určeny van der Waalsovými silami mezi polymerními řetězci. Při zahřátí nebo rychlé deformaci mohou řetězce klouzat kolem sebe. Kombinace slabých mezimolekulárních sil s vysokými intramolekulárními silami díky uhlovodíkové páteři podporuje flexibilitu a pružnost polymerních řetězců. Extrudovaný PS je přibližně stejně pevný jako nelegovaný hliník, ale mnohem pružnější a má menší hustotu ( $1,05 \text{ g/cm}^3$  pro PS oproti  $2,70 \text{ g/cm}^3$  pro hliník) [17].

PS a kopolymery PS se běžně zpracovávají vstřikováním, vakuovým tvarováním nebo extrudováním. V posledních letech se vyrábějí kompozity z expandovaného PS s celulózou a škrobem [18]. Některé z dalších aplikací PS jsou:

- spotřebiče: ledničky, klimatizace, trouby, mikrovlnné trouby, vysavače, mixéry jsou často vyrobeny z PS (pevného a pěnového), protože je inertní, nákladově efektivní a trvanlivý;
- automobilový průmysl: PS (pevný a pěnový) se používá k výrobě mnoha automobilových dílů, včetně přístrojových desek, obložení, panelů dveří absorbujících energii a pěny tlumící zvuk;
- elektronika: PS se používá jako součásti pro televizory, počítače a všechny typy IT zařízení;
- potraviny: obaly z PS obvykle lépe izolují, udržují potraviny čerstvé déle a mají nižší cenu než alternativy;
- izolace: lehká PS pěna poskytuje vynikající tepelnou izolaci v mnoha aplikacích, např. stěny a střechy budov, průmyslová chladírenská zařízení díky své inertnosti a odolnosti proti působení vody;
- lékařské aplikace: díky snadnosti sterilizace se PS používá pro výrobu zkumavek, Petriho misek, diagnostických komponent, pouzder pro testovací soupravy a lékařských zařízení;
- obaly: balení potravin, tácky na maso a vejce jsou obvykle vyrobeny z PS [19].

### 3.4 Vliv technologických parametrů procesu na kvalitu výrobků

V procesu injekčního vstřikování lze definovat rozsah zpracovatelských podmínek pro každý materiál. To, že se plastový díl zpracovává v rozsahu zpracovatelských podmínek nebo v rámci tzv. technologického okna, znamená, že se vyrobí díl požadované jakosti. Při překročení hranic technologického okna bude docházet ke vzniku vad výrobků [20]. Příklad rozsahu zpracovatelských podmínek nebo technologického okna je uveden na obrázku 7.



Obr. 7: Rozsah zpracovatelských podmínek [20]

Změna technologických parametrů vstřikování je nejjednodušší a nejlevnější metoda eliminace defektů výrobků. Odstranit vady lze změnou jednoho nebo více parametrů. Parametry procesu působí všechny najednou a navíc ovlivňují se navzájem, tudíž změna jednoho parametru ovlivní i ostatní parametry. Příčiny defektů mohou tkvít i v jiných faktorech, např. mohou být dané nesprávnou konstrukcí výrobku nebo formy vstřikolisu, ve vlastnostech vstřikovaného plastu. V tomto případě je třeba provádět složitější identifikaci s následujícím doladěním. Dalším komplikujícím faktorem je to, že každý typ zpracovávaného plastu je různě náchylný ke vzniku vad, proto se nelze při studiu vad řídit zobecněnými principy pro každý typ polymeru.

Chyby při nastavení technologických parametrů vstřikolisu mohou být příčinou většiny známých vad, přičemž jak zjevných tak skrytých. V obecném přístupu lze parametry rozdělit na ty, co mají okamžitý vliv na kvalitu výrobků, a na teplotní parametry, na ustálení kterých je třeba provést několik vstřikovacích cyklů. Při odstranění vad výrobků je preferovanější se řídit nejdřív změnou parametrů první skupiny, mezi které patří např. vstřikovací rychlost, vstřikovací tlak, bod přepnutí na dotlak a otáčky šneku. Ke změně teplotních parametrů (teplota topných zón, teplota taveniny nebo formy) je třeba přistupovat jen v případě, když se nepodařilo eliminovat vady pomocí parametrů první skupiny [21].



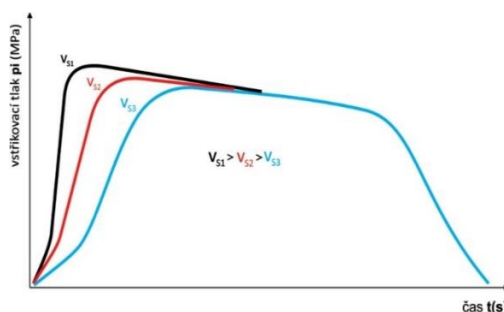
### 3.4.1 Význam kvality v procesu vstřikování

V plastikářském průmyslu se v posledních letech dopředu dostává inovace procesu. To zahrnuje všechny prostředky, které pomáhají porozumět a optimalizovat výrobní proces. Základem úspěchu firmy již není pouze výroba konkrétních komponent, ale výroba hotového produktu v nejlepší kvalitě a pokud možno co nejracionálnějším způsobem. Je třeba uvažovat i další faktory, např. kratší doba navrhování, nižší náklady a vyšší produktivita. Kvalita výrobků bude i nadále hlavním kritériem určujícím konkurenceschopnost výrobců. Vzhledem k rostoucímu využití plastů, rostoucí poptávce zákazníků a rychlému růstu globálního trhu se požadavky na kvalitu vstřikovaných dílů zpřísňují pro různá odvětví trhu, např. pro automobilový průmysl, IT průmysl, spotřební zboží, lékařství, mikroelektromechanické systémy, optický a telekomunikační průmysl atd.

### 3.4.2 Vady výrobků a vliv technologických parametrů

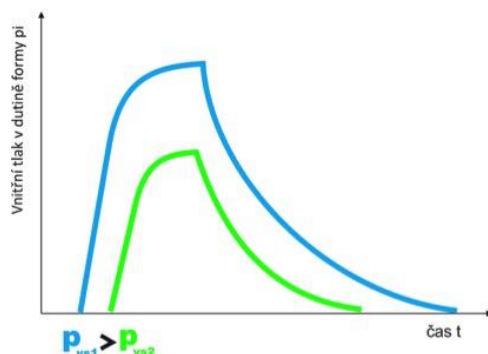
Mezi nejdůležitější faktory kvality patří mechanické vlastnosti, přesnost rozměrů, absence zkreslení, kvalita povrchu. Mezi technologické parametry, které mají největší vliv na kvalitu, patří vstřikovací rychlost, vstřikovací tlak, doba a hodnota dotlaku [22].

Vstřikovací rychlosti ovlivňuje dobu plnění formy. Závislost vstřikovací rychlosti a tlaku v dutině formy je uvedena na obrázku 8. S růstem vstřikovací rychlosti bude rychleji růst i vnitřní tlak. Bude růst i smykové namáhání a teplota taveniny, což dovede k poklesu její viskozity [23].



Obr. 8: Závislost vstřikovací rychlosti a průběhu tlaku v dutině formy [23]

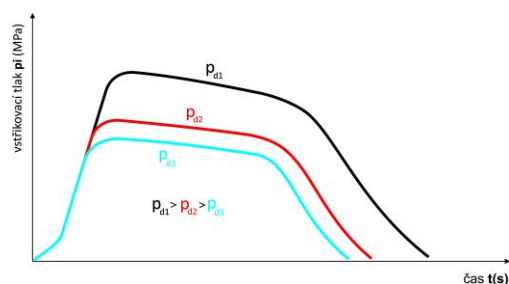
S růstem vstřikovacího tlaku roste tlak v dutině formy a zkracuje se doba plnění dutiny [22]. Závislost vstřikovacího tlaku a tlaku v dutině formy je uvedena na obrázku 9.



Obr. 9: Závislost vstřikovacího tlaku a průběhu tlaku v dutině formy [22]

Na druhou stranu stejně jako u vstřikovací rychlosti růst vstřikovacího tlaku má za následek zvýšení smykového namáhání a teploty taveniny a pokles její viskozity. Kvalita dílů se bude charakterizovat růstem hmotnosti a pnutí ve výrobku [24].

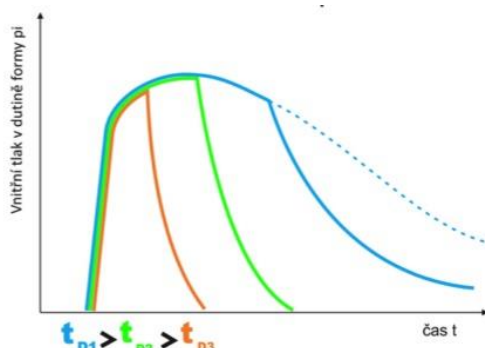
Výrazný vliv na kvalitu výrobků má velikost dotlaku [23]. Časová závislost velikosti dotlaku a tlaku v dutině formy je uvedena na obrázku 10.



Obr. 10: Závislost velikosti dotlaku a průběhu tlaku v dutině formy [23]

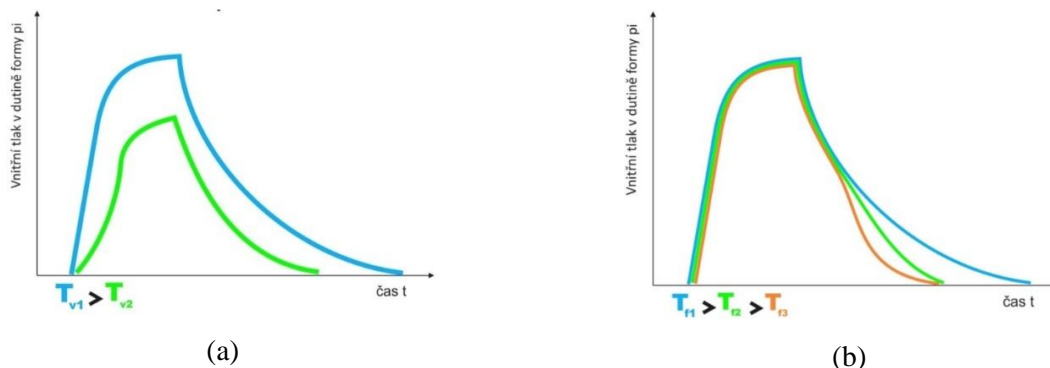
S růstem velikosti dotlaku se zvyšuje tlak v dutině formy a to, jak bylo zmíněno dříve, vede ke vzniku pnutí ve výrobku, růstu jeho hmotnosti, ale sníží se smrštění. Při nedostatečné velikosti dotlaku dojde ke vzniku propadlin, staženin neboli lunek [22].

Při nedostatečné době dotlaku se budou vyskytovat propadliny a výrobek bude více smršťovat. Může dojít ke vzniku povrchových vad. S vyšší dobou dotlaku dojde ke vzniku přetoků [22]. Závislost doby dotlaku a tlaku v dutině formy je uvedena na obrázku 11.



Obr. 11: Závislost doby dotlaku a průběhu tlaku v dutině formy [22]

Mezi nedůležitější teplotní parametry patří teplota taveniny a teplota formy. Jejich závislost s tlakem v dutině formy je uvedena na obrázku 12. Změna uvedených teplot ovlivňuje dobu chlazení a dotlaku [22].

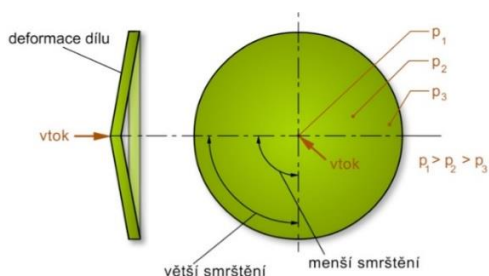


Obr. 12: Závislost teploty taveniny (a) a teploty formy (b) na průběhu tlaku v dutině formy [22]

S vyšší teplotou taveniny dojde ke snížení její viskozity a ke zvýšení tlaku v dutině. V tomto případě vzniknou na výrobcích přetoky, může dojít i ke spáleninám a degradaci plastu působením teploty. Při malé teplotě taveniny se zvyšuje možnost vzniku studených spojů. S vyšší teplotou formy se výrobky budou více smršťovat, což může vést ke vzniku propadlin a lunkrů, ale výhodou v tomto případě je snížení pnutí ve výrobcích [23].

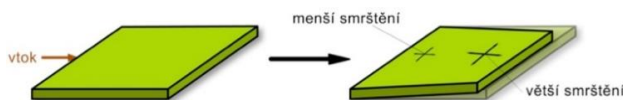
### 3.4.3 Vliv orientačních jevů na kvalitu výrobků

Orientace spočívá v řízeném protahování termoplastických molekul v určitých směrech za účelem zvýšení pevnosti, tuhosti, zlepšení optických, elektrických a jiných vlastností výrobků. Orientace se dosahuje např. vysokou rychlostí nebo tlakem, při kterém dochází k orientaci makromolekul ve směru toku. Tyto makromolekuly v orientovaném tvaru ztuhnou a tím dojde ve výrobku k anizotropii vlastností. Orientaci makromolekul lze řídit i teplotou taveniny a formy, s růstem kterých se na rozdíl od vstřikovací rychlosti a tlaku snižuje výskyt orientačních jevů. Anizotropie vlastností znamená rozdílné vlastnosti v podélném a příčném směru. Důležitý z hlediska kvality výrobků je vliv anizotropie na smrštění, jelikož kromě anizotropie vlastností dojde i k anizotropii smrštění ve výrobku [24]. Vliv anizotropie smrštění na vlastnosti plastových výrobků je znázorněn na obrázku 13.



Obr. 13: Vliv anizotropie smrštění na vlastnosti plastových výrobků [24]

Rozdíl podélného a příčného smrštění se v závislosti na krystalinitě plastu liší, např. semkrystalické plasty vykazují rozdíl až 30 %, amorfnní plasty až 10 %. Anizotropie smrštění záleží i na směru toku taveniny. Obecně lze říct, že je výrobní smrštění menší ve směru toku taveniny, tj. ve směru vyšší orientace [24]. Tento jev je znázorněn na obrázku 14.



Obr. 14: Anizotropie smrštění v závislosti na směru toku taveniny [24]

### 3.5 Využití softwaru ke zvýšení kvality vstřikovaných dílů

Počítačové modelování hraje klíčovou roli při kontrole kvality vstřikování a zlepšuje pochopení procesu vstřikování a vzájemných vztahů mezi parametry vstřikovacího procesu. Místo nákladného procesu výroby metodou pokusů a omylů je možné pomocí softwaru předvídat a optimalizovat kvalitu produktu za nižší cenu. Řízení procesu pomocí počítače vede k rychlému nastavení, automatické výrobě a celkovému zvýšení kvality dílů. Na druhou stranu, pro zvýšení kvality je třeba při modelování opakovat podmínky procesu s vysokou přesností. Existuje však spousta nepředvídatelných odchylek, včetně mechanických a hydraulických odchylek strojů a odchylek materiálů, které je obtížné modelovat. Přesné řízení procesu vstřikovacího stroje proto hraje důležitou roli při zajišťování opakovatelnosti a spolehlivosti kvality produktu [9].

Simulační nástroje Computer Aided Engineering (CAE) by mohly nahradit tradiční přístup pokusů a omylů a pomoci vybrat materiál, navrhnout produkt a formu a efektivněji nastavit podmínky vstřikování. Parametry procesu lze nejprve nastavit krok za krokem ve fázi simulace a dále je upravit ve fázi optimalizace procesu. Nirkhe a Barry porovnali metodu nastavení založenou na softwaru s metodou manuálního nastavení a výsledky ukazují, že se prvním přístupem získávají podmínky procesu, které vedou ke konzistentnějším hmotnostem a rozměrům dílů než druhý přístup [25]. Turng a Peic integrovali nástroj CAE s různými optimalizačními algoritmy, které pomáhají identifikovat optimální podmínky procesu k dosažení různých cílů optimalizace při splnění určitých omezení [26]. Lam, Britton a Deng představili systém simulace pro určení parametrů procesu, který umožňuje konstruktérům specifikovat kritéria měření kvality, např. minimální tlak v dutině a smykové napětí, rovnoměrné rozložení doby chlazení, teplota na konci vstřikovacího cyklu a objemové smrštění [27].

#### 3.5.1 Metody optimalizace procesu vstřikování

Metoda Design of Experiment (DOE) byla navržena Taguchim a je používána k efektivnějšímu získání experimentálních dat. Metoda zahrnuje strukturované experimenty, tj. systematické změny příslušných technologických parametrů (kontrolních faktorů) vstřikolisu s cílem optimalizovat proces tak, aby byla minimalizována variabilita zvolené charakteristiky kvality. Obecně lze metodu DOE použít ke studiu variability charakteristik kvality v závislosti na úrovni kontrolních faktorů [10]. Taguchi využil metodu ortogonálního pole, což je matice

technologických parametrů. Ortogonální pole umožňuje matematicky nezávislé hodnocení účinku všech kontrolních faktorů. Pomocí experimentální matice lze prokázat, že ve variabilitě různých úrovní kontrolních faktorů existují neoptimálnější technologické parametry. Cílem je definovat tyto technologické parametry, tj. vstupní parametry a prokázat stupeň jejich vlivu na výstupní parametry tj. parametry kvality. Existují standardní ortogonální pole, ale lze je zkonstruovat nebo upravit tak, aby vyhovovaly specifickým potřebám [28]. Lal a Vasudevan zkoumali účinky parametrů stroje na proces vstřikování dílu z LDPE [29]. Chen použil ortogonální pole Taguchiho pro optimalizaci procesu vstřikování. Byly zkoumány 9 faktorů na 3 úrovních a jejich vliv na smrštění dílu. Dále byly identifikovány 4 nejdůležitější faktory a pro zpracování dat byla použita metoda regresní analýzy [30]. Packianather aplikoval ortogonální pole Taguchiho k optimalizaci parametrů procesu mikrovstřikování. Byl zkoumán vliv na kvalitu výrobku u 4 parametrů procesu: teplota taveniny, teplota formy, velikost dotlaku a vstřikovací rychlost [31]. Mathivanan minimalizoval propadliny na výrobku pomocí metody Taguchiho. Bylo použito ortogonální pole ze 7 faktorů na 2 úrovních. Byl zjištěn vliv konstrukční úpravy topné zóny na velikost propadlin [32]. Kavade použil metodu Taguchiho k optimalizaci parametrů procesu vstřikování PP dílu. Pro design bylo vzato v úvahu 7 faktorů na 3 úrovních a 1 faktor na 2 úrovních. Kvantitativní hodnocení výsledků bylo provedeno pomocí metody statistické analýzy Analysis of Variance (ANOVA). Bylo zjištěno, že teplota taveniny a vstřikovací tlak byly nejvlivnějšími faktory [33]. Tyto studie naznačují, že lze použít metodu Taguchiho v případech, kde manipulace s parametry procesu může zlepšit kvalitu dílu. Sestrojení ortogonálního pole pro optimalizaci kvality bylo použito v dané diplomové práci a popsáno v její experimentální části.

Technika DOE byla široce používána ke generování experimentálních dat a určení optimálních parametrů procesu pro vstřikování plastů. Skourlis, Mohapatra a Chassapis pomocí metody DOE zkoumali vliv technologických parametrů na mechanické vlastnosti styrenových pryskyřic. Zjistilo se, že doba a velikost dotlaku má nejdominantnější účinek, a některé parametry, zejména vstřikovací teplota, byly identifikovány jako významné. Interakce mezi parametry byly analyzovány na základě orientace makromolekul a struktury pryskyřic během zpracování [34]. Heinisch, Lockner a Hopmann zkoumali různé variace DOE pro aplikaci v procesu injekčního vstřikování. Byly zkoumány různé metody DOE a simulovány vztahy mezi 6 parametry vstřikování a 3 faktory kvality vzorku PP desky [35]. Tsai, Hsieh a Lo aplikovali DOE pro zkoumání vlivu technologických parametrů injekčního vstřikování na vlastnosti optických

čoček. Byl analyzován a kvantifikován vliv technologických parametrů na kvalitu optických čoček, zejména zvlnění dílů [36]. Tyto studie ukazují, že pomocí ortogonálního pole parametrů lze odhalit interakce mezi technologickými parametry s minimálním počtem experimentu. Liao, Chang a Chen začali s podmínkami procesu navrženými nástrojem CAE a poté je optimalizovali pomocí DOE pro minimalizaci smrštění a deformace tenkostěnného dílů. Ve 3 pozorovaných faktorech kvality byl dotlak nejdůležitějším parametrem procesu mezi 4 technologickými parametry studovanými v tomto experimentu. Bylo prokázáno, že s růstem velikosti dotlaku snižuje se smrštění dílů [37]. Pujari a Naik použili metodu Taguchiho pro optimalizaci parametrů vstřikování tenkostěnného dílů. Při optimalizaci byly brány v úvahu 4 faktory na 4 úrovních: teplota taveniny, vstřikovací tlak, dotlak a doba chlazení. Bylo zjištěno, že nejdůležitějším faktorem je velikost dotlaku [38].

Ke zlepšení účinnosti DOE můžou být do této metody začleněny další statistické metody. Kuhmann a Ehrenstein spojili Taguchiho metodu s metodou Shaininova pro zpřesnění procesu vstřikování [39]. Jednou z metod vhodných pro kombinaci s metodou Taguchiho je analytická metoda Gray Relational Analysis (GRA). Mehat, Kamaruddin a Othman použili kombinaci metody Taguchiho s GRA pro optimalizaci parametrů vstřikování ozubeného kola z PP. Byly prokázány výhody simulačního experimentu proti provedení reálných experimentů a spolehlivost předpovědi parametrů kvality vstřikovaného dílu, např. objemové smrštění, velikost propadlin na ozubeném kole. Pomocí metody GRA byly stanoveny optimální parametry vstřikování a procentní efekty změny technologických parametrů na kvalitu výlisku a prokázána efektivita aplikace dané metody pro simulaci procesu s několika proměnnými pro minimalizaci počtů reálných experimentů [40]. Teorie GRA iniciovaná Dengem využívá relační generování a vypočítává relační koeficienty pro řešení nejistého systematického problému za podmínek částečně známých informací. Pomocí této metody lze definovat optimální kombinaci technologických parametrů a odhalit důležité faktory založené na ortogonálním poli. V GRA jsou experimentální nebo simulační výsledky kvality produktů nejprve normalizovány a poté se vypočítává relační koeficient (Gray Relational Coefficient, GRC) a relační třída (Gray Relational Grade, GRG) pro stanovení vztahů mezi optimálním a skutečným normalizovaným výsledkem [9]. V několika již uvedených studiích se používá kombinace DOE s jinými statistickými metodami, např. Mehat, Kamaruddin a Othman použili výpočet poměru Signal-to-Noise jako část statistické analýzy při optimalizaci procesu vstřikování ozubeného

kola [40]. Již uvedená metoda ANOVA je rozšířená při provedení statistické analýzy experimentálních dat. V experimentální části dané diplomové práce byl popsán algoritmus aplikace metody DOE v kombinaci s GRA pro optimalizaci parametrů procesu vstřikování. Uvedená kombinace byla vybrána jako preferovanější a mezi její výhody patří možnost nahradit tradiční přístup změny jednoho parametru za čas. Dána kombinace byla aplikována Changem, pro optimalizaci procesu vstřikování PC vyztuženého skleněnými vlákny. Analýza byla založena na softwaru C-Mold [41].

### **3.5.2 Využití SOLIDWORKS Plastics pro modelování procesu vstřikování**

Použití softwarů v procesu vstřikování je určeno pro simulaci procesu a k detekci možných problémů a vad výrobků v předvýrobní fázi. Rovněž lze pomocí programů optimalizovat technologické parametry, což vede nejen k optimalizaci kvality, ale i k ekonomickým výhodám celkové výroby. Softwarové programy pro vstřikování plastů jsou určeny pro:

- výpočet pohybu čela taveniny pro informaci o místech spojů, vzduchových kapsách a rozložení tlaku během fáze plnění tvarové dutiny formy;
- výpočet smykových rychlostí a smykových napětí;
- analýzu fáze dotlaku a smrštění;
- určení nejvýhodnějšího provozu stroje a jeho závislosti na parametrech;
- predikci orientace makromolekul [7].

Software SOLIDWORKS Plastics simuluje 4 hlavní kroky procesu vstřikování se 4 analytickými moduly pro analýzu plnění (modul Flow), dotlaku (modul Pack), deformace (modul Warp) a chlazení (modul Cool). Pomocí uvedených modulu lze vyhodnotit celý proces vstřikování, včetně chladicího systému uvnitř formy a jeho vlivu na procesy plnění a dotlaku. Modul Flow predikuje, jakým způsobem tekutý plastový materiál vyplní dutinu. Počítá přenos tepla mezi materiálem a formou během plnění a předpovídá změny viskozity při tuhnutí materiálu. Modul Pack simuluje podmínky uvnitř dutiny před vyhozením dílu. Modul Cool provádí analýzu přenosu tepla za účelem získání přechodové distribuce teploty, ke které dojde uvnitř formy během cyklu vstřikování. Modul Warp předpovídá konečný tvar, rozměry dílu a zbytková napětí po vyjmutí z formy.



## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 4.1 Charakteristika materiálů použitých pro vstřikování

Pro experiment byly vybrány 3 typy semikrystalického homopolymeru PP od firmy ORLEN Unipetrol a.s.: Mosten GB 002, Mosten GB 218, Mosten MA 230. Uvedené typy se liší hlavně svými ITT. Byl vybrán 1 amorfni materiál od firmy SYNTHOS Kralupy a.s.: Krasten PS GP 154. Vlastnosti uvedených materiálů jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4: Vlastnosti materiálů vybraných pro experiment [41]

Parametr	Jednotky	Hodnoty			
Název	-	Mosten GB 002	Mosten GB 218	Mosten MA 230	Krasten PS GP 154
Typ	-	Semikrystal. termoplast	Semikrystal. termoplast	Semikrystal. termoplast	Amorfni termoplast
ITT	g/10 min	2 (230 °C/2,16 kg)	18 (230 °C/2,16 kg)	30 (230 °C/2,16 kg)	9-10 (200 °C/5 kg)
Výrobní smrštění	%	1,95 (podél) 2,08 (napříč)	1,76 (podél) 1,93 (napříč)	1,72 (podél) 1,87 (napříč)	0,2-0,5 (objemové)
Modul pružnosti v tahu	MPa	1600	1450	1450	3100
Napětí na mezi kluzu	MPa	35	33	35	45
Prodloužení na mezi kluzu	%	9	9	9	2
Celková tažnost	%	200	350	250	-
Houževnatost Charpy 23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	6,5	3	2	10
Teplota tání	°C	168–172	168–172	168–172	-
Teplota měknutí dle Vicata	°C	155	153	154	86
HDT (1,8 MPa)	°C	55	54	55	75

PP Mosten je termoplastický materiál, při pokojové teplotě pevný, bez zápachu a bez chuti, vykazuje vysoký stupeň krystalinity, vysokou teplotní stabilitu a odolnost proti většině chemikálií. PP Mosten neobsahuje žádné mechanické nečistoty. Je dodáván v podobě přírodního granulátu. Typické rozmezí sypné hmotnosti PP Mosten je 450–600 kg/m<sup>3</sup>.

PP Mosten se vyznačuje dobrými tepelně-izolačními vlastnostmi. Oblast teplot tání krystalického podílu homopolymerů je 160–168 °C, kopolymerů 125–168 °C. Teplota skelného přechodu  $T_g$  homopolymerů je cca –10 °C. Se snižující se teplotou klesá houževnatost materiálu a pod teplotou –20 °C je materiál již značně křehký. V oblasti záporných teplot je vhodnější použít

kopolymery, které mají obecně teplotu skelného přechodu  $T_g$  posunutou k výrazně nižším hodnotám než homopolymery. V oblasti vysokých teplot lze PP Mosten používat trvale do 100 °C, tepelně stabilizované typy do 105 °C. Stupeň tepelné stability všech typů PP Mosten je takový, že při obvyklém způsobu zpracování nedochází k významné degradaci materiálu [46].

PP Mosten GB 002 je víceúčelový homopolymer se základní aditivací vhodný pro vstřikování, pro výrobu tkacích pásků, vstřikovaných výrobků, fólií pro následné tvarování, dutých obalů [42]. PP Mosten GB 218 je víceúčelový homopolymer se základní aditivací vhodný pro vstřikování a extruzi, pro výrobu technických dílů, domácích potřeb, uzávěrů, multifilamentů, stříží, kompaundů [43]. PP Mosten GB 230 je víceúčelový homopolymer s antistatickou stabilizací vhodný pro vstřikování, pro výrobu tkacích pásků, provazu a motouzu, pro výrobu tenkostěnných produktů, domácích potřeb [44].

Krasten PS GP 154 je standardní PS, bezbarvý termoplastický materiál, který se zpracovává vstřikováním, vytlačováním a tepelným tvarováním. Materiál má formu válcového granulátu o průměru 2,5 až 6 mm. Vstřikováním se vyrábějí např. misky, dózy, šroubovací uzávěry, Petriho misky. Vytlačováním se vyrábějí fólie a desky, které se dále mohou zpracovávat tepelným tvarováním na obaly. Pro tento typ zpracování jsou obvykle vlastnosti Krasten PS GP 154 modifikovány míšením s houževnatým polystyrenem (HIPS) nebo s kopolymerem styren-butadien-styren (SBR). Používá se jako koextruzní materiál při vytlačování desek a fólií s lesklým povrchem. Složení polymeru splňuje požadavky na zdravotní nezávadnost a lze jeho proto používat pro výrobu předmětů přicházejících do styku s potravinami [45].

## 4.2 Charakteristika vstřikovacího stroje

Pro vstřikování byl použit stroj Allrounder 320 C od firmy Arburg, který je ukázán na obrázku 15.



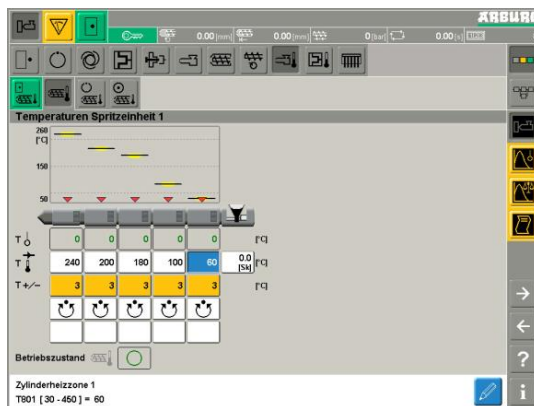
Obr. 15: Vstřikolis Allrounder 320 C od firmy Arburg [47]

Základní parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5: Parametry vstřikolisu Allrounder 320 C [47]

Parametr	Jednotka	Hodnota
Uzavírací síla	max. kN	500
Objem dávky	max. cm <sup>3</sup>	115
Hmotnost dávky	max. g PS	105
Otevírací síla/zdvih	max. kN/mm	130/350
Výška formy	min. mm	200
Vzdálenost mezi deskami formy	max. mm	550
Vzdálenost mezi spojovacími sloupky (šířka × výška)	mm	320 × 320
Hmotnost pohyblivé části	max. kg	180
Vyhazovací síla/zdvih	max. kN/mm	30/125

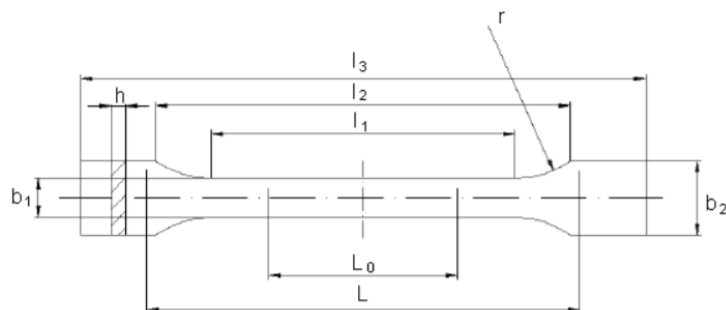
Vstřikovací stroj je vybaven řídicím systémem SELOGICA direct, pomocí kterého se nastavovaly technologické parametry. Okno nastavení teploty topných zón je ukázáno na obrázku 16.



Obr. 16: Okno nastavení teploty topných zón v řídicím systému SELOGICA [47]

### 4.3 Konstrukce zkušebních těles podle normy ČSN EN ISO 527-2

V experimentu byly vstřikovány a zkoumány zkušební tělíska podle normy ČSN EN ISO 527-2 (2012) typu 1A ve formě tzv. dogbone [48]. Tvar zkušebního tělíska je znázorněn na obrázku 17.



Obr. 17: Tvar zkušebního tělíska typu 1A [48]

Charakteristické rozměry tělíska jsou uvedeny v tabulce 6.

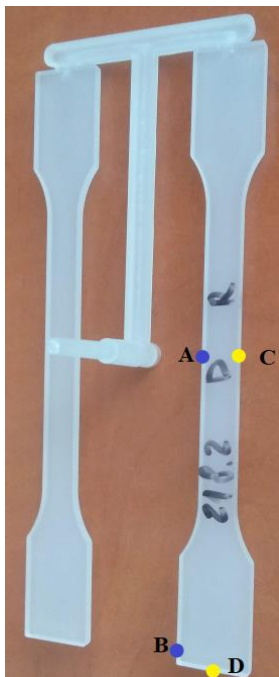
Tabulka 6: Charakteristické rozměry tělíska vybraného pro experiment [48]

Rozměr	Označení rozměru	Hodnota, [mm]
Celková délka	$l_3$	$\geq 150$
Délka úzké rovnoběžné části	$l_1$	$80 \pm 2$
Poloměr	$r$	20 (dle normy: 20–25)
Vzdálenost mezi širokými rovnoběžnými částmi	$l_2$	110 (dle normy: 104–113)
Šířka širokých rovnoběžných částí	$b_2$	$20 \pm 0,2$
Šířka úzké rovnoběžné části	$b_1$	$10 \pm 0,2$
Tloušťka	$h$	$4 \pm 0,2$
Měřená délka	$L_0$	$50 \pm 0,5$
Počáteční vzdálenosti čelistí	$L$	$115 \pm 0,1$

## 4.4 Algoritmus optimalizace technologických parametrů vstřikování

### 4.4.1 Sledované parametry kvality zkušebních tělísku

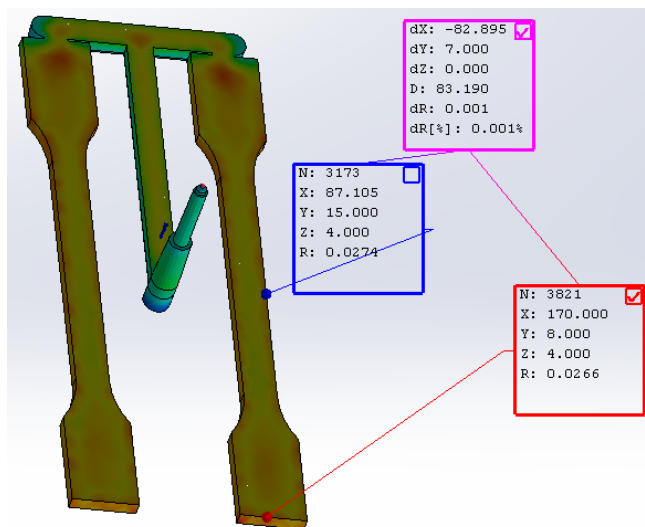
Jako parametry kvality byla zvolena rozměrová stálost a hmotnost dílů. Pro vyhodnocení rozměrové stálosti byly měřeny rozměry tělísek v bodech uvedených na obrázku 18.



Obr. 18: Zkušební tělísko s označenými body, ve kterých byly měřeny rozměry

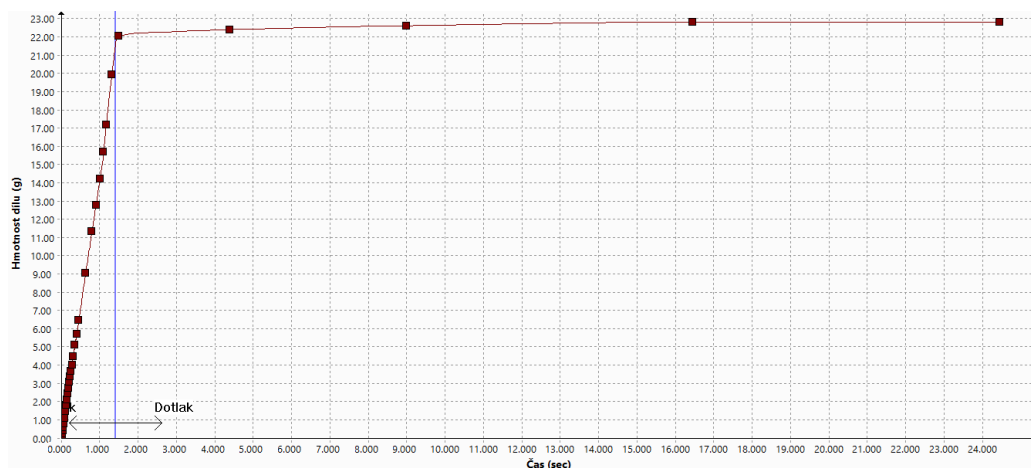
V bodech označených na obrázku 18 modrou barvou byla měřena šířka zkušebního tělíska, tedy v bodech A a B, v bodech označených žlutou barvou byla měřena tloušťka tělíska, tedy v bodech C a D. Rozměry tělíska byly měřeny posuvným měřítkem s přesností na 0,01 mm.

Při simulaci v SOLIDWORKS Plastics se měřily rozměry 3D tělíska ve stejných bodech. Na obrázku 19 je ukázán příklad měření tloušťky 3D modelu zkušebního tělíska v bodech, které odpovídají bodům C a D z obrázku 18. Na obrázku 19 hodnota dR v modrém rámečku označuje zmenšení tloušťky tělíska v bodě C, hodnota dR v červeném rámečku označuje zmenšení tloušťky tělíska v bodě D (v mm).



Obr. 19: Příklad měření tloušťky 3D modelu zkušební tělíska

Hmotnost zkušebních tělísek byla měřena vážením na analytických váhách z přesností 0,0001 g. Při simulaci se vypisovaly hodnoty hmotnosti z okénka výsledků. Graf změny hmotnosti dílu z materiálů Mosten GB 002 od začátku vstřikování do zchlazení na pokojovou teplotu (23 °C) je znázorněn na obrázku 20.



Obr. 20: Graf změny hmotnosti dílu od začátku vstřikování do zchlazení na pokojovou teplotu (23 °C), okénko výsledků SOLIDWORKS Plastics, materiál Mosten GB 002, teplota taveniny  $T_t$  220 °C, vstřikovací rychlost  $V_v$  20 cm<sup>3</sup>/s, vstřikovací tlak  $p_v$  50 MPa, dotlak  $p_d$  35 MPa, bod přepnutí  $b_p$  70 % vyplněného objemu, doba dotlaku  $t_d$  14 s, doba chlazení  $t_{ch}$  10 s

#### 4.4.2 Výběr technologických parametrů vstřikování

V experimentu byl hodnocen vliv teploty taveniny, vstřikovací rychlosti, vstřikovacího tlaku, velikosti dotlaku, doby dotlaku, bodu přepnutí na dotlak a doby chlazení na kvalitu vstřikovaných dílů. Teplota formy se řídí pomocí temperační jednotky firmy Piovan a byla nastavena na konstantní hodnotu pro všechny materiály. Podle technických listů doporučené rozmezí teploty formy pro všechny materiály činí 20–60 °C, zvolena byla střední hodnota teploty formy 40 °C pro všechny materiály.

Pro kvantifikaci vlivu jednotlivých technologických parametrů na kvalitu byla použita metoda Design of Experiment (DOE). Jedná se o analytickou techniku, jejímž cílem je pomocí experimentů kvantifikovat závislost kvality výrobku na změně jednotlivých technologických parametrů. Pro stanovení původních technologických parametrů byly uvažovány informace z technických listů od výrobců, rekomendace k parametrům procesu vstřikování použitých materiálů. Pro simulaci byly zvoleny 3 úrovně technologických parametrů pro stanovení tendence změny kvality v závislosti na technologických parametrech.

Tabulka 7 znázorňuje rozsah vybraných technologických parametrů pro materiál Mosten GB 002.

Tabulka 7: Technologické parametry pro injekční vstřikování, Mosten GB 002

Řádek	Parametry	Jednotky	Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3
A	Teplota taveniny	°C	220	240	260
B	Vstřikovací rychlost	cm <sup>3</sup> /s	20	30	40
C	Vstřikovací tlak	MPa	40,0	50,0	60,0
D	Dotlak	MPa	25,0	30,0	35,0
E	Bod přepnutí na dotlak	% vypln. objemu	65	70	75
F	Doba dotlaku	s	6	10	14
G	Doba chlazení	s	10	20	30

Tabulka 8 znázorňuje rozsah vybraných technologických parametrů pro materiál Mosten GB 218.

Tabulka 8: Technologické parametry pro injekční vstřikování, Mosten GB 218

Řádek	Parametry	Jednotky	Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3
A	Teplota taveniny	°C	200	220	240
B	Vstřikovací rychlost	cm <sup>3</sup> /s	15	25	35
C	Vstřikovací tlak	MPa	30,0	35,0	40,0
D	Dotlak	MPa	15,0	20,0	25,0
E	Bod přepnutí na dotlak	% vypln. objemu	70	75	80
F	Doba dotlaku	s	6	10	14
G	Doba chlazení	s	10	20	30

Tabulka 9 znázorňuje rozsah vybraných technologických parametrů pro materiál Mosten MA 230.

Tabulka 9: Technologické parametry pro injekční vstřikování, Mosten MA 230

Řádek	Parametry	Jednotky	Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3
A	Teplota taveniny	°C	195	210	225
B	Vstřikovací rychlost	cm <sup>3</sup> /s	15	25	35
C	Vstřikovací tlak	MPa	20,0	25,0	30,0
D	Dotlak	MPa	10,0	12,5	15,0
E	Bod přepnutí na dotlak	% vypln. objemu	75	80	85
F	Doba dotlaku	s	6	10	14
G	Doba chlazení	s	10	20	30

Tabulka 10 znázorňuje rozsah vybraných technologických parametrů pro materiál Krasten PS GP 154.

Tabulka 10: Technologické parametry pro injekční vstřikování, Krasten PS GP 154

Řádek	Parametry	Jednotky	Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3
A	Teplota taveniny	°C	220	230	240
B	Vstřikovací rychlost	cm <sup>3</sup> /s	20	30	40
C	Vstřikovací tlak	MPa	30,0	35,0	40,0
D	Dotlak	MPa	15,0	20,0	25,0
E	Bod přepnutí na dotlak	% vypln. objemu	75	80	85
F	Doba dotlaku	s	6	10	14
G	Doba chlazení	s	10	20	30

#### 4.4.3 Sestrojení ortogonálního pole technologických parametrů

Pro experiment byly vybrány různé variace technologických parametrů, které představuje tzv. ortogonální pole technologických parametrů, což je základem návrhu experimentu. Ortogonální pole technologických parametrů je široce využíváno v inženýrské analýze. V tabulce 7 každá úroveň má v každém sloupci stejný počet výskytů. Každé pole lze identifikovat pomocí formuli  $L_A (B^C)$ . Index A představuje počet experimentů nebo kombinací faktorů, které lze v experimentech provést. Parametr B označuje počet úrovní v každém sloupci. Každá úroveň se vyskytuje ve sloupci 5krát. Index C označuje počet sloupců v ortogonálním poli. Pro experiment bylo vybráno ortogonální pole s konfigurací  $L_{15} (3^7)$ .



Pole technologických parametrů pro materiál Mosten GB 002 je uvedeno v tabulce 11.

Tabulka 11: Ortogonální pole technologických parametrů  $L_{15}$  ( $3^7$ ), Mosten GB 002

Číslo experimentu	Technologické parametry a jejich úrovně						
	A, [°C]	B, [cm <sup>3</sup> /s]	C, [MPa]	D, [MPa]	E, [%]	F, [s]	G, [s]
1	220	20	50,0	35,0	70	14	10
2	220	40	40,0	30,0	65	10	30
3	220	30	60,0	25,0	75	6	20
4	220	20	50,0	35,0	70	14	10
5	220	30	60,0	25,0	75	6	20
6	240	40	40,0	30,0	65	10	30
7	240	30	60,0	30,0	65	10	20
8	240	20	50,0	25,0	75	14	30
9	240	40	40,0	35,0	70	6	10
10	240	30	60,0	30,0	65	10	20
11	260	40	40,0	35,0	70	6	10
12	260	20	50,0	25,0	75	14	30
13	260	40	60,0	25,0	65	6	10
14	260	20	50,0	35,0	70	10	30
15	260	30	40,0	30,0	75	14	20

Pole technologických parametrů pro materiál Mosten GB 218 je uvedeno v tabulce 12.

Tabulka 12: Ortogonální pole technologických parametrů  $L_{15}$  ( $3^7$ ), Mosten GB 218

Číslo experimentu	Technologické parametry a jejich úrovně						
	A, [°C]	B, [cm <sup>3</sup> /s]	C, [MPa]	D, [MPa]	E, [%]	F, [s]	G, [s]
1	200	15	35,0	25,0	75	14	10
2	200	35	30,0	20,0	70	10	30
3	200	25	40,0	15,0	80	6	20
4	200	15	35,0	25,0	75	14	10
5	200	25	40,0	15,0	80	6	20
6	220	35	30,0	20,0	70	10	30
7	220	25	40,0	20,0	70	10	20
8	220	15	35,0	15,0	80	14	30
9	220	35	30,0	25,0	75	6	10
10	220	25	40,0	20,0	70	10	20
11	240	35	30,0	25,0	75	6	10
12	240	15	35,0	15,0	80	14	30
13	240	35	40,0	15,0	70	6	10
14	240	15	35,0	25,0	75	10	30
15	240	25	30,0	20,0	80	14	20

Pole technologických parametrů pro materiál Mosten GB 230 je uvedeno v tabulce 13.

Tabulka 13: Ortogonální pole technologických parametrů  $L_{15}$  ( $3^7$ ), Mosten GB 230

Číslo experimentu	Technologické parametry a jejich úrovně						
	A, [°C]	B, [cm <sup>3</sup> /s]	C, [MPa]	D, [MPa]	E, [%]	F, [s]	G, [s]
1	195	15	25,0	15,0	80	14	10
2	195	35	20,0	12,5	75	10	30
3	195	25	25,0	10,0	80	6	10
4	195	15	30,0	15,0	85	14	20
5	195	25	30,0	10,0	85	6	20
6	210	35	20,0	12,5	75	10	30
7	210	25	30,0	12,5	75	10	20
8	210	15	25,0	10,0	85	14	30
9	210	35	20,0	15,0	80	6	10
10	210	25	30,0	12,5	75	10	20
11	225	35	20,0	15,0	80	6	10
12	225	15	25,0	10,0	85	14	30
13	225	35	30,0	10,0	75	6	10
14	225	15	25,0	15,0	80	10	30
15	225	25	20,0	12,5	85	14	20

Pole technologických parametrů pro materiál Krasten PS GP 154 je uvedeno v tabulce 14.

Tabulka 14: Ortogonální pole technologických parametrů  $L_{15}$  ( $3^7$ ), Krasten PS GP 154

Číslo experimentu	Technologické parametry a jejich úrovně						
	A, [°C]	B, [cm <sup>3</sup> /s]	C, [MPa]	D, [MPa]	E, [%]	F, [s]	G, [s]
1	220	20	35,0	25,0	80	14	10
2	220	40	30,0	20,0	75	10	30
3	220	30	35,0	15,0	80	6	10
4	220	20	40,0	25,0	85	14	20
5	220	30	40,0	15,0	85	6	20
6	210	40	30,0	20,0	75	10	30
7	210	30	40,0	20,0	75	10	20
8	210	20	35,0	15,0	85	14	30
9	210	40	30,0	25,0	80	6	10
10	210	30	40,0	20,0	75	10	20
11	200	40	30,0	25,0	80	6	10
12	200	20	35,0	15,0	85	14	30
13	200	40	40,0	15,0	75	6	10
14	200	20	35,0	25,0	80	10	30
15	200	30	30,0	20,0	85	14	20

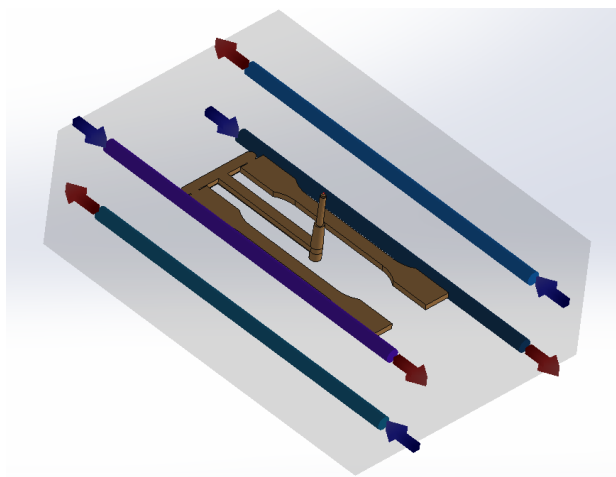
#### 4.5 Simulace procesu vstřikování v SOLIDWORKS Plastics

Simulace procesu vstřikování byla provedena pomocí softwaru SOLIDWORKS Plastics. Pro simulaci byl použit návrh zkušebního tělíska typu 1A. 3D výkres zkušebních tělísek včetně vtokové soustavy byl původně zpracován v softwaru SOLIDWORKS. V modulu SOLIDWORKS Plastics existuje varianta simulace s konceptuálním návrhem vtokové soustavy, tedy konstruováním vtokové soustavy pomocí dialogového okna, ale v daném případě byla vtoková soustava vymodelována jako objemové tělo pro dosažení přesnější analýzy. 3D model zkušebních tělísek se vtokovou soustavou je uveden na obrázku 21. Dále model byl importován do doplňkového modulu SOLIDWORKS Plastics pro simulaci procesu vstřikování.



Obr. 21: 3D model zkušebního tělíska typu 1A se vtokovou soustavou

Stejným způsobem byly vypracovány modely formy a chladicích kanálů pro simulaci procesu chlazení. 3D model zkušebního tělíska typu 1A, formy a systému chlazení je uveden na obrázku 22.

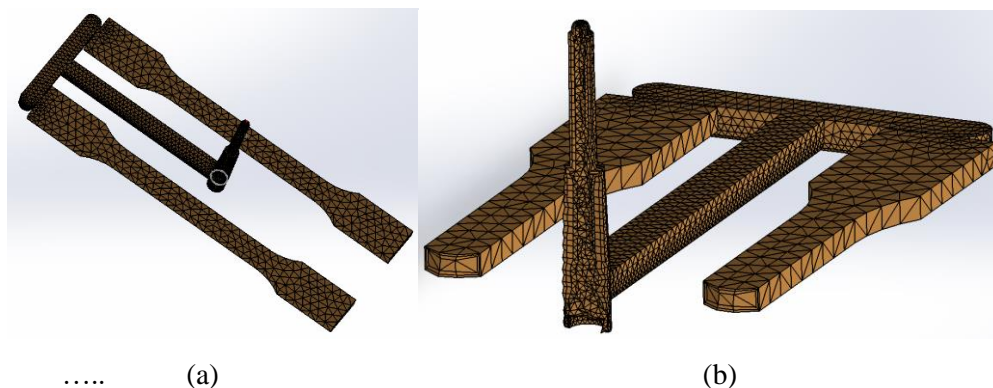


Obr. 22: 3D model zkušebního tělíska typu 1A, formy a systému chlazení

Při modelování byly použity reálné rozměry a materiál formy. U systému chlazení byly v programu zadány průměr kanálů, typ, teplota, průtok a směr toku (je znázorněn šipkami na obrázku 22) chladicího média. Konstrukce systému chlazení taky v plné míře odpovídá reálné konstrukci formy instalované na vstřikovacím stroji. Jako chladicí médium v souladu s reálným experimentem byla použita voda.

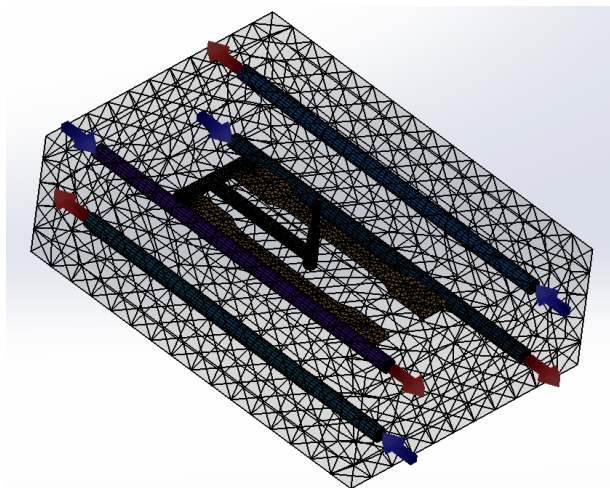
#### 4.5.1 Vytvoření objemové sítě

Pro analýzu procesu musí být v modelu zkušebního tělíska vytvořena vhodná síť konečných prvků. Síť dělí jednotlivé domény simulačního modelu (výrobek včetně vtokové soustavy, forma, systém chlazení) do nespojitých buněk. V každé buňce software aplikuje příslušné rovnice zachování. Rovnice zachování vypočítá tok roztaveného polymeru a teplo, simuluje fáze změn, když tavenina chladne, a předpovídá zbytková napětí a jejich vliv na tvar dílu. Pro analýzu byl zvolen typ sítě hybridní čtyřstěn což je typ s čtyřbokou hybridní sítí, který používá trojúhelníkovou povrchovou síť jako základnu k vytváření čtyřbokých objemových prvků, které jsou zkombinovány s hraničními vrstvami. Na obrázku 23 je znázorněn 3D model zkušebního tělíska s objemovou sítí a řez zkušebního tělíska pro demonstraci konstrukce objemové sítě.



Obr. 23: Zkušební tělísko s objemovou sítí typu hybridní čtyřstěn (a) a řez zkušebního tělíska pro demonstraci konstrukce objemové sítě (b)

Stejným způsobem se vytváří objemová síť pro systém chlazení a formu. Na obrázku 24 znázorněn 3D model zkušebního tělíska typu 1A, formy a systému chlazení s objemovou sítí.



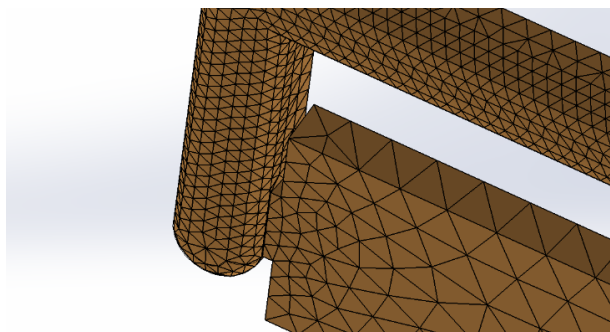
Obr. 24: 3D model zkušebního tělíska typu 1A, formy a systému chlazení s objemovou sítí

Parametry použité objemové sítě jsou uvedeny v tabulce 15.

Tabulka 15: Parametry použité objemové sítě

Rozměr	Hodnota
Typ objemové sítě	Hybridní čtyřstěn
Celkový počet uzlů povrchové sítě	8 382
Celkový počet prvků povrchové sítě	12 888
Celkový počet uzlů objemové sítě	59 595
Celkový počet prvků objemové sítě	253 199

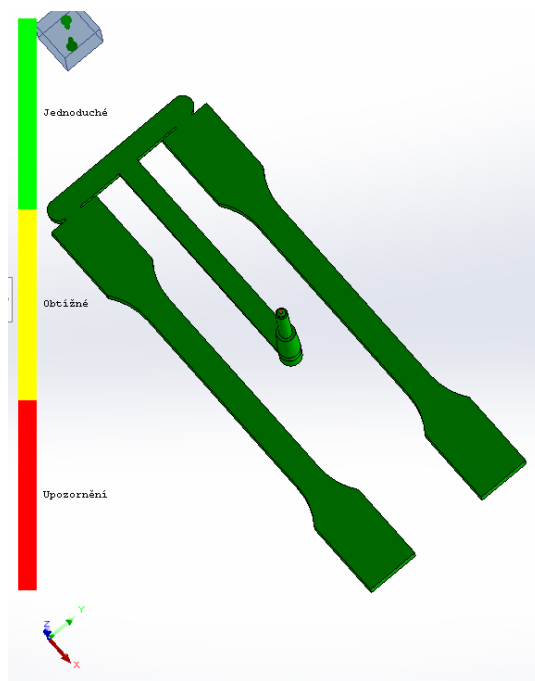
Pro zpřesnění výsledků se používá zakřivení sítě, které zjemní síť v těch oblastech modelu, kde se nacházejí malé prvky. Lze nastavit zjemněnou síť pro malé geometrické prvky (např. místa vstříku) a hrubou síť pro ostatní oblasti. Zjemnění sítě v kritických oblastech zlepšuje přesnost výsledků, ale současně prodlouží dobu výpočtu. Na obrázku 25 je ukázán příklad zjemnění sítě v místech zakřivení zkušebního tělíska.



Obr. 25: Zjemnění sítě v místech zakřivení zkušebního tělíska

#### 4.5.2 Provedení simulace vstřikování

Technologické parametry simulace vstřikování byly pro jednotlivé materiály nastaveny podle údajů uvedených v tabulkách 7, 8, 9 a 10, podle kterých následně byl prováděn reálný experiment na vstřikovacím stroji. U všech materiálů v každém z 15 sérií se kontrolovala snadnost plnění. Obrázek 26 znázorňuje výsledek úspěšnosti plnění.

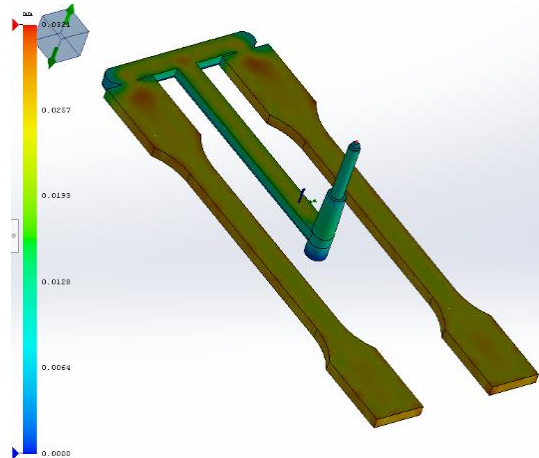


Obr. 26: Výsledek úspěšnosti plnění dutiny formy v SOLIDWORKS Plastics, Mosten GB 002,  $T_t$  220 °C,  $V_v$  20 cm<sup>3</sup>/s,  $p_v$  50 MPa,  $p_d$  35 MPa,  $b_p$  70 % vyplněného objemu,  $t_d$  14 s,  $t_{ch}$  10 s

Zeleně označené oblasti lze plnit při normálním nastaveném vstřikovacím tlaku. Žlutě označené oblasti jsou místa, kde vstřikovací tlak překračuje 70 % maximálního vstřikovacího tlaku stroje. Červeně označené oblasti jsou místa, kde vstřikovací tlak překračuje 85 % maximálního vstřikovacího tlaku stroje. Žluté a červené oblasti na obrázku indikují určitou pravděpodobnost nedolisků (short filling), i když to může vypadat, že čelo taveniny kompletně vyplní dutinu.

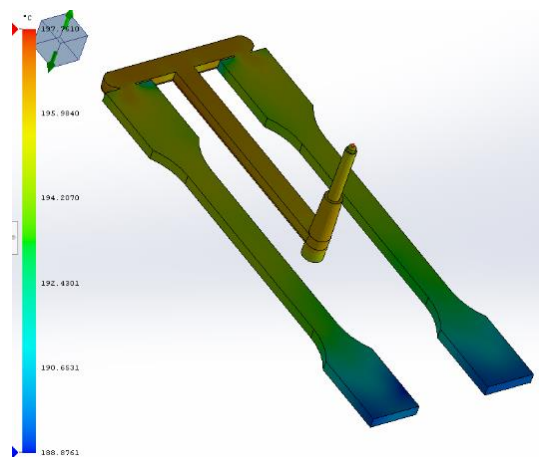
Technologické parametry pro každý materiál byly vybrány tak, aby v každé z 15 sérií docházelo k jednoduchému plnění, tedy aby v každé sérii 100 % objemu výlisku byla v zelené oblasti. Bylo to dosaženo úvodní simulací všech sérií a v případě, že se v alespoň jedné sérii nepodařilo dosáhnout 100 % úspěšnosti plnění, technologické parametry byly upravovány a celý proces simulace 15 sérií byl začat znovu, tedy byla pomocí úvodní simulace v SOLIDWORKS Plastics provedena částečná optimalizace technologických parametrů.

Pomocí simulace byla definována místa, ve kterých docházelo k největším deformacím vstřikovaných dílů. Z výsledků simulace byly definovány oblasti výrobku, ve kterých dojde k největším propadlinám a napětím ve výrobku. Výsledek analýzy propadlin v SOLIDWORKS Plastics, materiál Mosten MA 230 je znázorněn na obrázku 27.



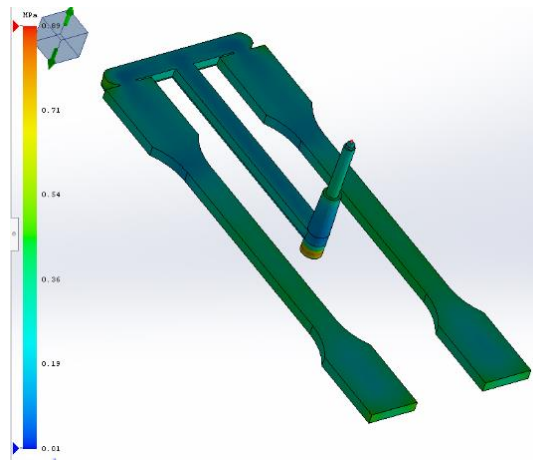
Obr. 27: Výsledek analýzy propadlin v SOLIDWORKS Plastics, Mosten GB 002,  $T_i$  220 °C,  $V_v$  20 cm<sup>3</sup>/s,  $p_v$  50 MPa,  $p_d$  35 MPa,  $b_p$  70 % vyplněného objemu,  $t_d$  14 s,  $t_{ch}$  10 s

Z analýzy toku byla definována doba plnění, změny teploty a tlaku během plnění, objemové smrštění na konci plnění, doba tuhnutí, teplota čela taveniny a podobné parametry. Výsledek analýzy teploty čela taveniny v SOLIDWORKS Plastics, materiál Mosten GB 002 je znázorněn na obrázku 28.



Obr. 28: Výsledek analýzy teploty čela taveniny v SOLIDWORKS Plastics, Mosten GB 002,  $T_i$  220 °C,  $V_v$  20 cm<sup>3</sup>/s,  $p_v$  50 MPa,  $p_d$  35 MPa,  $b_p$  70 % vyplněného objemu,  $t_d$  14 s,  $t_{ch}$  10 s

Analýza fáze dotlaku poskytuje údaje o teplotě a tlaku na konci plnění, hodnoty smykového napětí a podobně. Výsledek analýzy smykového napětí v SOLIDWORKS Plastics, materiál Mosten GB 002 je znázorněn na obrázku 29.



Obr. 29: Výsledek analýzy smykového napětí v SOLIDWORKS Plastics, Mosten GB 002,  $T_i$  220 °C,  $V_v$  20 cm<sup>3</sup>/s,  $p_v$  50 MPa,  $p_d$  35 MPa,  $b_p$  70 % vyplněného objemu,  $t_d$  14 s,  $t_{ch}$  10 s

Tím pádem simulace procesu vstřikování sloužila k lepšímu pochopení, jak se bude výlisek chovat po vypadnutí z formy a zchladnutí na pokojovou teplotu, tj. k definování slabých míst výrobku. Výsledkem úvodní simulace v SOLIDWORKS Plastics bylo určení parametrů pro reálný experiment na vstřikovací stroji a hodnoty vybraných parametrů kvality po samotné simulaci 15 sérií pro každý materiál byly použity pro porovnání s výsledky reálného experimentu. Při simulaci bylo hodnoceno to, v jaké míře změna jednotlivých parametrů ovlivňuje kvalitu výrobku. Zjistilo se, že v procentním poměru nejvíc ovlivňuje kvalitu změna (v rámci vybraného rozmezí a s přijatým krokem změny 10 MPa) vstřikovacího tlaku a proto bylo hledáno takové rozmezí vstřikovacího tlaku, aby měl graf vlivu parametru na kvalitu jednoznačný pík.

#### 4.6 Ověření teoretického modelu praktickým vstřikováním

Vstřikování zkušebních tělísek bylo provedeno na stroji stroj Allrounder 320 C od firmy Arburg, jehož technické charakteristiky jsou uvedeny v bodě 4.2. Pro nastavení teploty formy se používala temperační jednotka firmy Piovan.

Jako první byly vstřikovány výrobky z materiálu Mosten GB 002, parametry vstřikování kterého jsou uvedeny v bodě 4.4.3. Po nastavení parametrů byly provedeny vždy několik výrobních cyklů pro ustálení parametrů a 5 výrobních cyklů bylo provedeno pro výrobu samotných



výlisků pro měření, tedy bylo v každé sérii vyrobeno 5 zkušebních tělísek, jejichž parametry kvality byly dále měřeny. Tabulka 16 znázorňuje teploty topných zón vstřikolisu pro materiál Mosten GB 002.

Tabulka 16: Teploty topných zón pro materiál Mosten GB 002

Série vzorků	Teploty topných zón dle čísla zóny, [°C]				
	1	2	3	4	5
<b>1–5</b>	220	220	210	200	180
<b>6–10</b>	240	240	225	205	180
<b>10–15</b>	260	260	245	210	180

Při vstřikování materiálu Mosten GB 002 byla prokázána spolehlivost měření a shoda výsledků s modelem. Navíc byly výlisky měřeny hned po zchladnutí na pokojovou teplotu, tedy rozměry výrobků jednotlivých sérií bylo třeba měřit během vstřikování dalších sérií. Proto pro optimalizaci práce a pro plynulost současné výroby a měření byl u ostatních materiálů počet výlisků pro měření snížen a měřily se vždy 4 výlisky.

Tabulka 17 znázorňuje teploty topných zón vstřikolisu pro materiál Mosten GB 218.

Tabulka 17: Teploty topných zón pro materiál Mosten GB 218

Série vzorků	Teploty topných zón dle čísla zóny, [°C]				
	1	2	3	4	5
<b>1–5</b>	200	200	195	190	170
<b>6–10</b>	220	220	210	200	180
<b>10–15</b>	240	240	225	205	180

Tabulka 18 znázorňuje teploty topných zón vstřikolisu pro materiál Mosten MA 230.

Tabulka 18: Teploty topných zón pro materiál Mosten MA 230

Série vzorků	Teploty topných zón dle čísla zóny, [°C]				
	1	2	3	4	5
<b>1–5</b>	195	195	190	180	170
<b>6–10</b>	210	210	200	190	180
<b>10–15</b>	225	225	215	195	180

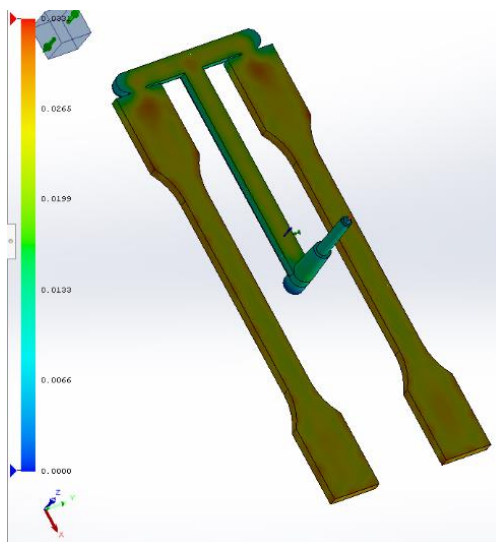
Tabulka 19 znázorňuje teploty topných zón vstřikolisu pro materiál Krasten PS GP 154.

Tabulka 19: Teploty topných zón pro materiál Krasten PS GP 154

Série vzorků	Teploty topných zón dle čísla zóny, [°C]				
	1	2	3	4	5
<b>1–5</b>	220	220	210	200	180
<b>6–10</b>	230	230	220	200	180
<b>10–15</b>	240	240	225	205	180

## 4.7 Analýza propadlin na zkušebním tělísku

Pro materiály Mosten GB 002 a Mosten GB 218 byla provedena analýza propadlin v SOLIDWORKS Plastics. Na obrázku 30 je znázorněn výsledek analýzy propadlin pro materiál Mosten GB 002.



Obr. 30: Výsledek analýzy propadlin v SOLIDWORKS Plastics, Mosten GB 002,  $T_f$  220 °C,  $V_f$  20 cm<sup>3</sup>/s,  $p_v$  50 MPa,  $p_d$  35 MPa,  $b_p$  70 % vyplněného objemu,  $t_d$  14 s,  $t_{ch}$  10 s

Podle výsledků analýzy propadlin se předpokládá, že k největším propadlinám zkušebního tělíska dojde v jeho nejširší části blízko vtoku. Největší hodnota propadlin podle simulace za uvedených parametrů činí 0,354 mm. Při tloušťce dogbonu 4 mm jsou takové propadliny viditelné i na reálných výliscích ve stejném místě. Předpokládá se, že u výrobků s větší tloušťkou stěny může dojít k výraznějším propadlinám na povrchu.

Velikost propadlin záleží jak na nastavených technologických parametrech, tak na konstrukci formy. Technologické parametry lze měnit během výroby, ale nesprávná konstrukce formy ztěžuje nebo znemožňuje eliminaci propadlin. Vzhledem k tomu, že se forma skládá z jednotlivých desek, lze konstrukční úpravu vtoku provést bez výměny celé formy, ale pouze úpravou desky tvořící svým otvorem vtokové ústí na desku s jiným průměrem otvoru. V bodě 5.2 dané diplomové práce byly popsány výsledky analýzy propadlin pro materiály Mosten GB 002 a Mosten GB 218.

## 5 VÝSLEDKY A DISKUZE

### 5.1 Optimalizace technologických parametrů

#### 5.1.1 Výsledky simulace a reálného experimentu

Výsledky měření parametrů kvality materiálu Mosten GB 002 jsou uvedeny v tabulce 20. Hodnoty rozměrů tělíska byly vypočteny odečtením hodnot zkrácení rozměrů od původních rozměrů tělíska v bodech uvedených na obrázku 19. Pro přehlednost jsou v tabulce představeny již vypočtené hodnoty rozměrů.

Tabulka 20: Hodnoty parametrů kvality po simulaci vstřikování, Mosten GB 002

Číslo série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
1	9,9303	19,8573	3,9759	3,9783	22,8170
2	9,9191	19,8364	3,9724	3,9750	22,5900
3	9,9097	19,8167	3,9686	3,9712	22,4110
4	9,9322	19,8573	3,9759	3,9783	22,8170
5	9,9097	19,8166	3,9687	3,9712	22,4110
6	9,9107	19,8196	3,9691	3,9726	22,4600
7	9,9115	19,8217	3,9695	3,9726	22,4640
8	9,9216	19,8405	3,9736	3,9763	22,5580
9	9,8998	19,8004	3,9646	3,9684	22,3200
10	9,9118	19,8223	3,9696	3,9727	22,4740
11	9,8912	19,7837	3,9617	3,9655	22,1910
12	9,9159	19,8267	3,9713	3,9744	22,4260
13	9,8920	19,7830	3,9621	3,9657	22,0310
14	9,9039	19,8057	3,9671	3,9705	22,4070
15	9,9139	19,8249	3,9707	3,9739	22,4690

Naměřené po simulaci rozměry a hmotnosti tělíska v bodech ukázaných na obrázku 19 pro materiál Mosten GB 218 jsou uvedeny v příloze 6, pro materiál Mosten MA 230 v příloze 17 a pro materiál Krasten PG GP 154 v příloze 28.

Hodnoty parametrů kvality jednotlivých sérií po reálném experimentu pro materiál Mosten GB 002 jsou uvedeny v tabulce 21. Pro přehlednost a snadnost porovnání s výsledky simulace jsou v tabulce 21 uvedeny pouze průměrné hodnoty parametrů kvality. Výsledky pro všechny měřené výlisky včetně hodnot směrodatných odchylek jsou uvedeny v přílohách 1–5.

Tabulka 21: Hodnoty parametrů kvality jednotlivých sérií po reálném experimentu, Mosten GB 002

Číslo série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
1	9,6940	19,5640	3,9520	3,9360	21,7792
2	9,7920	19,5700	3,9480	3,9400	21,6245
3	9,7040	19,5660	3,9440	3,9500	21,3100
4	9,7120	19,6020	3,9540	3,9560	21,7627
5	9,7140	19,5460	3,9420	3,9440	21,3028
6	9,7340	19,5980	3,9560	3,9520	21,5544
7	9,7440	19,5780	3,9520	3,9580	21,5057
8	9,7460	19,6020	3,9520	3,9520	21,7602
9	9,7500	19,5440	3,9420	3,9320	21,2996
10	9,7340	19,6180	3,9460	3,9520	21,4978
11	9,7480	19,5700	3,9460	3,9420	21,1510
12	9,7220	19,6380	3,9560	3,9480	21,6610
13	9,7440	19,5900	3,9320	3,9360	21,0635
14	9,7380	19,6320	3,9368	3,9400	21,4225
15	9,7040	19,5940	3,9460	3,9480	21,7397

Naměřené parametry kvality jednotlivých sérií po reálném experimentu včetně hodnot směrodatných odchylek pro materiál Mosten GB 218 jsou uvedeny v přílohách 7–11, pro materiál Mosten MA 230 v přílohách 18–22 a pro materiál Krasten PG GP 154 v přílohách 29–33.

### 5.1.2 Numerické zpracování naměřených dat z reálného vstřikování

Vzhledem k tomu, že rozsahy a jednotky technologických parametrů se liší, je třeba naměřená data dále nejdřív přepracovat pro kvantifikaci vlivu jednotlivých parametrů na rozměry a hmotnost výrobku. Přepracování dat zahrnuje přenos původní sekvence dat do srovnatelné sekvence (normalizace) a následující vyhodnocení vlivu jednotlivých technologických parametrů na parametry kvality. Nechme původní sekvenci reprezentovat jako  $x_i^{(o)}(k)$  a srovnatelnou sekvenci jako  $x_i^*(k)$ , kde  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $k = 1, 2, \dots, n$ . Pokud je preferována co nejvyšší hodnota původní sekvence, lze původní sekvenci normalizovat podle rovnice 5.1.2.1:

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^{(o)}(k) - \min x_i^{(o)}(k)}{\max x_i^{(o)}(k) - \min x_i^{(o)}(k)} \quad (5.1.2.1)$$

Pokud je preferována co nejnižší hodnota původní sekvence, lze původní sekvenci normalizovat podle rovnice 5.1.2.2:

$$x_i^*(k) = \frac{\max x_i^{(o)}(k) - x_i^{(o)}(k)}{\max x_i^{(o)}(k) - \min x_i^{(o)}(k)} \quad (5.1.2.2)$$

Pokud je třeba dosáhnout konkrétní cílové hodnoty původní sekvence, lze původní sekvenci normalizovat podle rovnice 5.1.2.3:

$$x_i^*(k) = \frac{|x_i^{(o)}(k) - CH|}{\max [\max x_i^{(o)}(k) - CH, CH - \min x_i^{(o)}(k)]} \quad (5.1.2.3)$$

V uvedených rovnicích  $x_i^*(k)$  je hodnota po předzpracování dat,  $\max x_i^{(o)}(k)$  je největší hodnota  $x_i^{(o)}(k)$ ,  $\min x_i^{(o)}(k)$  je nejmenší hodnota  $x_i^{(o)}(k)$  a  $CH$  je cílová hodnota původní sekvence. Normalizované výsledky leží v rozmezí od 0 do 1, přičemž nejlepší z hlediska kvality normalizované výsledky se rovnají 1 a vyšší hodnota normalizovaných výsledků odpovídá lepší kvalitě [9].

Jak již bylo zmíněno, jako sledované parametry kvality byly v daném experimentu vybrány rozměry a hmotnost zkušebních tělísek. Z hlediska kvality jsou pro oba uvedené parametry preferovanější co nejvyšší hodnoty. To znamená, že experimentální data je třeba normalizovat

podle rovnice 5.1.2.1. V tabulce 22 jsou představeny výsledky přepracovaných hodnot sledovaných parametrů kvality simulovaného procesu vstřikování.

Tabulka 22: Přepracované výsledky simulace procesu vstřikování, Mosten GB 002

Číslo série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
1	0,9537	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
2	0,6805	0,7187	0,7535	0,7422	0,7112
3	0,4512	0,4536	0,4859	0,4453	0,4835
4	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
5	0,4512	0,4522	0,4930	0,4453	0,4835
6	0,4756	0,4926	0,5211	0,5547	0,5458
7	0,4951	0,5209	0,5493	0,5547	0,5509
8	0,7415	0,7739	0,8380	0,8438	0,6705
9	0,2098	0,2342	0,2042	0,2266	0,3677
10	0,5024	0,5289	0,5563	0,5625	0,5636
11	0,0000	0,0094	0,0000	0,0000	0,2036
12	0,6024	0,5882	0,6761	0,6953	0,5025
13	0,0195	0,0000	0,0282	0,0156	0,0000
14	0,3098	0,3055	0,3803	0,3906	0,4784
15	0,5537	0,5639	0,6338	0,6563	0,5573

Výsledky přepracovaných hodnot sledovaných parametrů kvality simulovaného procesu vstřikování pro materiál Mosten GB 218 jsou uvedeny v příloze 13, pro materiál Mosten MA 230 v příloze 24 a pro materiál Krasten PG GP 154 v příloze 35.

Stejným způsobem byly přepracovány výsledky reálného experimentu. V tabulce 23 jsou představeny výsledky přepracovaných hodnot sledovaných parametrů kvality reálného experimentu.

Tabulka 23: Přepracované výsledky reálného vstřikování, Mosten GB 002

Číslo série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
1	0,0000	0,2128	0,8333	0,1538	1,0000
2	1,0000	0,2766	0,6667	0,3077	0,7839
3	0,1020	0,2340	0,5000	0,6923	0,3444
4	0,1837	0,6170	0,9167	0,9231	0,9769
5	0,2041	0,0213	0,4167	0,4615	0,3343
6	0,4082	0,5745	1,0000	0,7692	0,6859
7	0,5102	0,3617	0,8333	1,0000	0,6178
8	0,5306	0,6170	0,8333	0,7692	0,9734
9	0,5714	0,0000	0,4167	0,0000	0,3299
10	0,4082	0,7872	0,5833	0,7692	0,6068
11	0,5510	0,2766	0,5833	0,3846	0,1223
12	0,2857	1,0000	1,0000	0,6154	0,8349
13	0,5102	0,4894	0,0000	0,1538	0,0000
14	0,4490	0,9362	0,2000	0,3077	0,5016
15	0,1020	0,5319	0,5833	0,6154	0,9448

Výsledky přepracovaných hodnot sledovaných parametrů kvality reálného experimentu pro materiál Mosten GB 218 jsou uvedeny v příloze 14, pro materiál Mosten MA 230 v příloze 25 a pro materiál Krasten PG GP 154 v příloze 36.

### 5.1.3 Výpočet relačních koeficientů a relační třídy

Po přepracování dat následuje výpočet relačního koeficientu GRC z přepracovaných sekvencí a relační třídy GRG. Relační koeficient stanoví vztah mezi optimálním (nejlepší se rovná 1) a skutečnými normalizovanými výsledky. Hodnota relačního koeficientu se vypočítá podle rovnice 5.1.3.1:

$$GRC = \frac{\Delta_{min} + \zeta \cdot \Delta_{max}}{\Delta_{oi}(k) + \zeta \cdot \Delta_{max}} \quad (5.1.3.1)$$

kde  $0 < \gamma \leq 1$ ,  $\Delta_{oi}(k)$  je sekvence odchylek mezi původní  $x_0^{(*)}(k)$  a srovnatelnou sekvencí  $x_i^{(*)}(k)$ ,  $\zeta$  je rozlišovací koeficient, hodnoty  $\Delta_{max}$  a  $\Delta_{min}$  se vypočítávají podle rovnic 5.1.3.2 a 5.1.3.3.

$$\Delta_{max} = \max (x_0^{(*)}(k) - x_i^{(*)}(k)) \quad (5.1.3.2)$$

$$\Delta_{min} = \min (x_0^{(*)}(k) - x_i^{(*)}(k)) \quad (5.1.3.3)$$

Hodnota rozlišovacího koeficientu  $\zeta$  se upravuje podle skutečné systematické potřeby v rozsahu od 0 do 1 a v daném případě se rovná 0,5 vzhledem k tomu, že všechny technologické parametry procesu mají stejnou váhu. Vyšší hodnota relačního koeficientu znamená, že odpovídající experimentální výsledek se blíží optimální (nejlepší) normalizované hodnotě. Relační třída GRG je průměrem relačních koeficientů GRC a slouží jako celková známka stupně vlivu technologických parametrů na parametry kvality [9].



Výsledky výpočtů relačních koeficientu GRC a relačních tříd GRG podle rovnic 5.1.3.1, 5.1.3.2 a 5.1.3.3 po simulaci pro materiál Mosten GB 002 jsou uvedeny v tabulce 24.

Tabulka 24: Výsledky výpočtů relačních koeficientu GRC a relačních tříd GRG po simulaci, Mosten GB 002

Číslo série	Relační koeficienty					Relační třída
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	Hmotnost, [g]	
1	0,9152	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9830
2	0,6101	0,6400	0,6698	0,6598	0,6339	0,6427
3	0,4767	0,4778	0,4931	0,4741	0,4919	0,4827
4	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
5	0,4767	0,4772	0,4965	0,4741	0,4919	0,4833
6	0,4881	0,4963	0,5108	0,5289	0,5240	0,5096
7	0,4976	0,5107	0,5259	0,5289	0,5268	0,5180
8	0,6592	0,6886	0,7553	0,7619	0,6028	0,6935
9	0,3875	0,3950	0,3859	0,3926	0,4416	0,4005
10	0,5012	0,5149	0,5299	0,5333	0,5340	0,5227
11	0,3333	0,3354	0,3333	0,3333	0,3857	0,3442
12	0,5571	0,5483	0,6068	0,6214	0,5013	0,5670
13	0,3377	0,3333	0,3397	0,3368	0,3333	0,3362
14	0,4201	0,4186	0,4465	0,4507	0,4894	0,4451
15	0,5284	0,5341	0,5772	0,5926	0,5304	0,5525

Výsledky výpočtů relačních koeficientu GRC a relačních tříd GRG po simulaci vstřikování pro materiál Mosten GB 218 jsou uvedeny v příloze 15, pro materiál Mosten MA 230 v příloze 26 a pro materiál Krasten PG GP 154 v příloze 37.

Výsledky výpočtů relačních koeficientu GRC a relačních tříd GRG podle 5.1.3.1, 5.1.3.2 a 5.1.3.3 po reálném experimentu pro materiálu Mosten GB 002 jsou uvedeny v tabulce 25.

Tabulka 25: Výsledky výpočtů relačních koeficientu GRC a relačních tříd GRG po reálném experimentu, Mosten GB 002

Číslo série	Relační koeficienty					Relační třída
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	Hmotnost, [g]	
1	0,3333	0,3884	0,7500	0,3714	1,0000	0,5686
2	1,0000	0,4087	0,6000	0,4194	0,6982	0,6253
3	0,3577	0,3950	0,5000	0,6190	0,4327	0,4609
4	0,3798	0,5663	0,8571	0,8667	0,9559	0,7252
5	0,3858	0,3381	0,4615	0,4815	0,4289	0,4192
6	0,4579	0,5402	1,0000	0,6842	0,6142	0,6593
7	0,5052	0,4393	0,7500	1,0000	0,5668	0,6522
8	0,5158	0,5663	0,7500	0,6842	0,9495	0,6931
9	0,5385	0,3333	0,4615	0,3333	0,4273	0,4188
10	0,4579	0,7015	0,5455	0,6842	0,5598	0,5898
11	0,5269	0,4087	0,5455	0,4483	0,3629	0,4584
12	0,4118	1,0000	1,0000	0,5652	0,7517	0,7457
13	0,5052	0,4947	0,3333	0,3714	0,3333	0,4076
14	0,4757	0,8868	0,3846	0,4194	0,5008	0,5335
15	0,3577	0,5165	0,5455	0,5652	0,9005	0,5771

Výsledky výpočtů relačních koeficientu GRC a relačních tříd GRG po reálném experimentu pro materiál Mosten GB 218 jsou uvedeny v příloze 16, pro materiál Mosten MA 230 v příloze 27 a pro materiál Krasten PG GP 154 v příloze 38.

### 5.1.4 Kvantifikace vlivu změny technologických parametrů na kvalitu výrobku, Mosten GB 002

Pro výpočet vlivu jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku byla pro každou úroveň parametrů vstřikování použita analýza hlavních efektů parametrů. Bylo to provedeno tříděním relačních tříd odpovídajícím úrovním parametrů vstřikování v každém sloupci ortogonálního pole a zprůměrováním relačních tříd stejné úrovně. Např. faktor *A* (teplota taveniny) byl pro materiál Mosten GB 002 nastaven na úroveň 1 (220 °C) v experimentech 1, 2, 3, 4 a 5, proto průměr relačních tříd pro faktor *A* se vypočítal podle rovnice 5.1.4.1:

$$A_1 = \frac{GRG_1 + GRG_2 + GRG_3 + GRG_4 + GRG_5}{5} \quad (5.1.4.1)$$

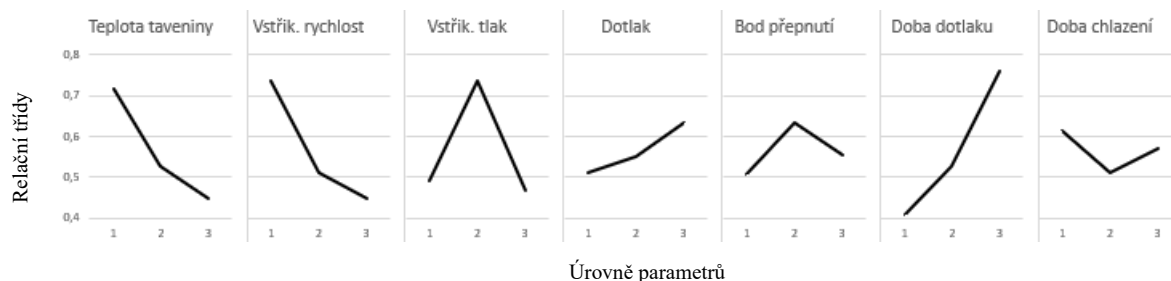
Stejným způsobem byly provedeny výpočty pro ostatní technologické parametry [9].

V tabulce 26 jsou uvedeny výsledky výpočtu vlivu jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku z materiálu Mosten GB 002 podle simulace procesu vstřikování.

Tabulka 26: Vliv jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku, Mosten GB 002, výsledky simulace

Označení parametru	Parametry	Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3	Vliv změny, [%]
A	Teplota taveniny	0,7183	0,5289	0,4490	14,7
B	Vstřik. rychlost	0,7377	0,5118	0,4467	18,0
C	Vstřik. tlak	0,4899	0,7377	0,4686	34,7
D	Dotlak	0,5125	0,5491	0,6346	3,0
E	Bod přepnutí	0,5058	0,6346	0,5558	3,2
F	Doba dotlaku	0,4094	0,5276	0,7592	24,4
G	Doba chlazení	0,6128	0,5118	0,5716	2,0

Experimentální data z tabulky 26 jsou graficky znázorněna na obrázku 31.



Obr. 31: Vliv jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku z materiálu Mosten GB 002, výsledky simulace

Z grafů lze definovat vliv jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku z materiálu Mosten GB 002. Vzhledem k tomu, že relační třída představuje úroveň korelace mezi původní a srovnatelnou sekvencí, větší relační třída znamená, že srovnatelná sekvence vykazuje lepší korelaci s původní sekvencí. V zásadě platí, že čím větší je relační třída, tím lepší jsou kvalitativní charakteristiky. Z obrázku 31 je patrné, že parametry kvality zkušebního tělíska jsou ovlivněny úpravami parametrů vstřikování. S ohledem na více parametrů kvality, pokud jde o rozměry a hmotnost výlisků, lze pozorovat dva opačné trendy, kdy zvýšení teploty taveniny a vstřikovací rychlosti vede k menším rozměrům a hmotnostem zkušebních tělísku. Naopak s růstem hodnoty a doby dotlaku dochází ke zlepšení kvality výrobku, tj. ke stálejším rozměrům a větším hmotnostem. U parametru doby chlazení došlo k objevení minima, které vyznačuje nejhorší hodnotu z hlediska kvality. Jak již bylo uvedeno, pro vstřikovací tlak se v průběhu úvodní simulace hledalo takové rozmezí hodnot, které by na grafu z obrázku 31 mělo jednoznačný pík. Po analýze dat metodou ANOVA se objevilo, že rozměry a hmotnost zkušebních tělísek nejvíce ovlivňuje změna vstřikovacího tlaku. Vybrané parametry kvality jsou ovlivněny změnou vstřikovacího tlaku na 34,7 %. Je třeba brát v úvahu, že tyto údaje jsou hodnocením pouze vybraných rozmezí technologických parametrů s přijatými kroky jejich změny. Např. v daném případě se rozmezí teploty taveniny mění od 220 do 260 °C s krokem 20 °C. Se zvýšením teploty taveniny její hodnota bude ovlivňovat kvalitu v menší míře (za současného zhoršení kvality), stejně tak méně ovlivní kvalitu změna teploty o 5 °C místo přijatých 20 °C. Druhým nejvíce ovlivňujícím kvalitu faktorem je v daném případě doba dotlaku: 24,4 %. Třetí nejdůležitější parametr je vstřikovací rychlost: 18,0 %. Podle simulace značně ovlivňuje kvalitu teplota taveniny: 14,7 %. Vliv změny ostatních parametrů leží v rozmezí pod 10 %.

V případě materiálu Mosten GB 002 lze neoptimálnější kombinaci parametrů a jejich úrovní snadno získat z analýzy hlavních efektů výběrem úrovně každého parametru s nejvyšší relační třídou. Ve výsledku se předpokládá, že optimální kombinací parametrů, které statisticky přivede k nejlepší kvalitě zkušebního tělíska je kombinace  $A_1, B_1, C_2, D_3, E_2, F_3, G_1$ : teplota taveniny 220 °C, vstřikovací rychlost 20 cm<sup>3</sup>/s, vstřikovací tlak 50 MPa, dotlak 35 MPa, bod přepnutí na dotlak 70 % vyplněného objemu dutiny formy, doba dotlaku 14 s, doba chlazení 10 s.

Z tabulky 26 a obrázku 31 je zřejmé, že kombinace parametrů  $A_3, B_3, C_3, D_1, E_1, F_1, G_2$  (teplota taveniny 260 °C, vstřikovací rychlost 40 cm<sup>3</sup>/s, vstřikovací tlak 60 MPa, dotlak 25 MPa,

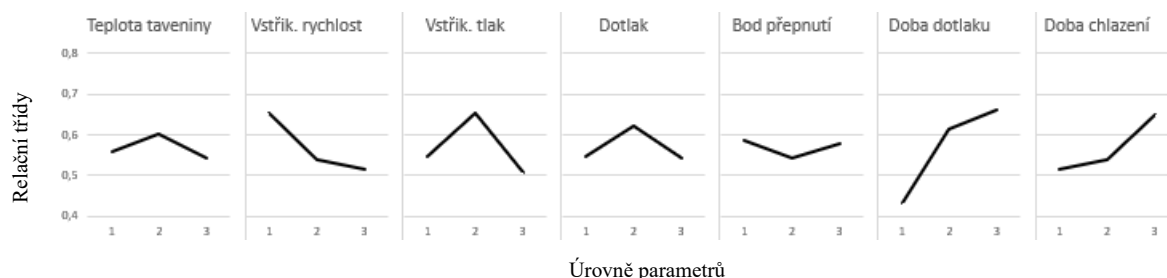
bod přepnutí na dotlak 65 % vyplněného objemu dutiny formy, doba dotlaku 6 s, doba chlazení 20 s) způsobí nejhorší kvalitu výlisků.

Stejným způsobem byl kvantifikován vliv technologických parametrů při reálném experimentu. V tabulce 27 jsou uvedeny výsledky výpočtu vlivu jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku z materiálu Mosten GB 002 podle reálného experimentu.

Tabulka 27: Vliv jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku, Mosten GB 002, výsledky reálného experimentu

Označení parametru	Parametry	Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3	Vliv změny, [%]
A	Teplota taveniny	0,5598	0,6027	0,5445	1,3
B	Vstřík. rychlost	0,6532	0,5398	0,5139	7,7
C	Vstřík. tlak	0,5478	0,6532	0,5059	59,5
D	Dotlak	0,5453	0,6207	0,5409	2,8
E	Bod přepnutí	0,5868	0,5409	0,5792	0,9
F	Doba dotlaku	0,4330	0,6120	0,6620	20,4
G	Doba chlazení	0,5157	0,5398	0,6514	7,4

Experimentální data z tabulky 27 jsou graficky znázorněna na obrázku 32.



Obr. 32: Vliv jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku z materiálu Mosten GB 002, výsledky reálného experimentu

V reálném experimentu se prokázal rozhodující vliv změny vstřikovacího tlaku, který činil 59,5 %. U vstřikovacího tlaku se prokazuje výsledek simulace a stejně tak hodnota vstřikovacího tlaku 50 MPa byla neoptimálnější a lze tedy konstatovat, že pomocí simulace byla definována neoptimálnější hodnota parametru, který nejvíc ovlivňuje kvalitu výrobků. Z grafů lze definovat, že stejně jako v simulaci zvýšení vstřikovací rychlosti vede k menším rozměrům a hmotnostem zkušebních tělísku a delší dotlak vede naopak ke zlepšení kvality výrobku. V obou případech se prokázal negativní vliv nejvyšší teploty taveniny, což zároveň je výhodnější z hlediska úspory energie při procesu vstřikování a snižuje možnost degradace materiálu. Porovnání vlivu změny dotlaku, bodu přepnutí na dotlak a doby chlazení nevede k jednoznačnému určení shody a lze to objasnit malým vlivem uvedených parametrů. Např. vstřikovací tlak nejvíc

ovlivňuje kvalitu a je v tomto případě větší možnost shody, naopak vliv změny dotlaku, bodu přepnutí na dotlak a doby chlazení se nachází v rozmezí pod 10 %, což zvyšuje možnost kolísání výsledných hodnot, tedy jen malé změny můžou vest ke změně trendu grafu. Vliv teploty nebyl při reálném experimentu tak značný jako v simulaci. Nejvíce ovlivňují kvality parametry vstřikovacího tlaku (59,5 %), doby dotlaku (20,4 %) a vstřikovací rychlosti (7,7 %), ve stejném pořadí jako v simulaci.

V případě reálného experimentu s materiálem Mosten GB 002 je neoptimálnější kombinace parametrů  $A_2, B_1, C_2, D_2, E_1, F_3, G_3$ : teplota taveniny 240 °C, vstřikovací rychlost 20 cm<sup>3</sup>/s, vstřikovací tlak 50 MPa, dotlak 30 MPa, bod přepnutí na dotlak 65 % vyplněného objemu dutiny formy, doba dotlaku 14 s, doba chlazení 30 s. Kombinace parametrů  $A_3, B_3, C_3, D_3, E_2, F_1, G_1$  (teplota taveniny 260 °C, vstřikovací rychlost 40 cm<sup>3</sup>/s, vstřikovací tlak 60 MPa, dotlak 35 MPa, bod přepnutí na dotlak 70 % vyplněného objemu dutiny formy, doba dotlaku 6 s, doba chlazení 10 s) způsobí nejhorší kvalitu vylisovaných tělísek.

V tabulce 28 jsou uvedeny výsledné parametry pro porovnání simulace a reálného experimentu.

Tabulka 28: Porovnání výsledných parametrů simulace a reálného experimentu, Mosten GB 002

Označení parametru	Parametry	Jednotky	Nejhorší kvalita		Nejlepší kvalita	
			Simulace	Experiment	Simulace	Experiment
A	Teplota taveniny	°C	260	260	220	240
B	Vstřik. rychlost	cm <sup>3</sup> /s	40	40	20	20
C	Vstřik. tlak	MPa	60,0	60,0	50,0	50,0
D	Dotlak	MPa	25,0	35,0	35,0	30,0
E	Bod přepnutí	% objemu	65	70	70	65
F	Doba dotlaku	s	6	6	14	14
G	Doba chlazení	s	20	10	10	30

S uvedenými technologickými parametry bylo provedeno vstřikování zkušebních tělísek. Pro porovnání bylo vstřikováno 4 série s parametry s nejnižší relační třídou a 4 série s parametry s nejvyšší relační třídou (vždy 2 série podle výsledků simulace a 2 série podle výsledků reálného experimentu). Výsledné parametry kvality po vstřikování s technologickými parametry s nejnižší relační třídou (nejhorší kvalita) jsou uvedeny v tabulce 29.

Tabulka 29: Porovnání výsledných parametrů simulace a reálného experimentu, nejmenší relační třída, Mosten GB 002

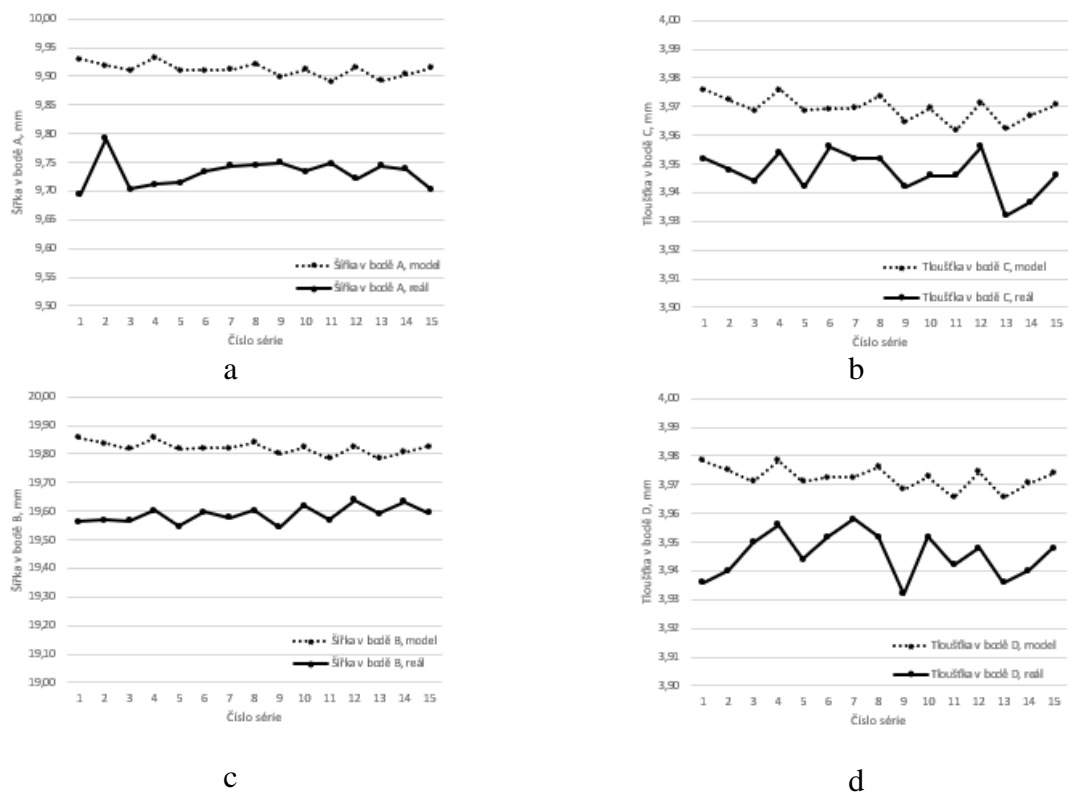
Zdroj výsledných parametrů	Série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
		Šířka středu v bodě A, [mm]	Tloušťka středu v bodě B, [mm]	Šířka okraje v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
Simulace	1	9,63	3,88	19,49	3,85	20,9155
	2	9,64	3,90	19,48	3,86	20,9185
Reál	1	9,68	3,90	19,51	3,88	20,8723
	2	9,69	3,88	19,53	3,89	20,9039

Výsledné parametry kvality po vstřikování s technologickými parametry s nejvyšší relační třídou (nejlepší kvalita) jsou uvedeny v tabulce 30.

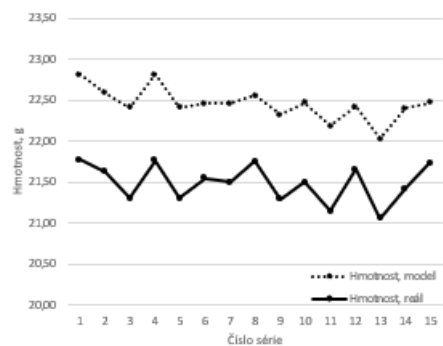
Tabulka 30: Porovnání výsledných parametrů simulace a reálného experimentu, nejvyšší relační třída, Mosten GB 002

Zdroj výsledných parametrů	Série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
		Šířka středu v bodě A, [mm]	Tloušťka středu v bodě B, [mm]	Šířka okraje v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
Simulace	1	9,82	3,95	19,76	3,94	21,9762
	2	9,84	3,96	19,70	3,93	21,9708
Reál	1	9,80	3,96	19,66	3,96	21,9567
	2	9,80	3,95	19,65	3,94	21,9578

Výsledky z tabulky 30 lze považovat za maximální hodnoty parametrů kvality, tedy je to nejlepší kvalita, které lze dosáhnout v rámci vybraných rozmezí technologických parametrů. Každá změna jednotlivých parametrů v přijatých rozmezích bude způsobovat zhoršení jednoho nebo více parametrů kvality. Jak je vidět z tabulky 30 vyšších hodnot kvality výrobků lze dosáhnout jak s parametry určených simulací, tak s výslednými parametry reálného experimentu. Spolehlivost výsledků simulace se prokazuje i z grafů absolutních hodnot parametrů kvality. Na obrázku 33 jsou ukázány výsledky měření rozměrů po zchladnutí na pokojovou teplotu (23 °C) a na obrázku 34 jsou uvedeny výsledky měření hmotností tělíska.



Obr. 33: Výsledky měření rozměrů tělíska, Mosten GB 002, šířka v bodě A (a), tloušťka v bodě C (b), šířka v bodě B (c), tloušťka v bodě D (d) po zchladnutí na pokojovou teplotu (23 °C)



Obr. 34: Výsledky měření hmotnosti tělíska, Mosten GB 002



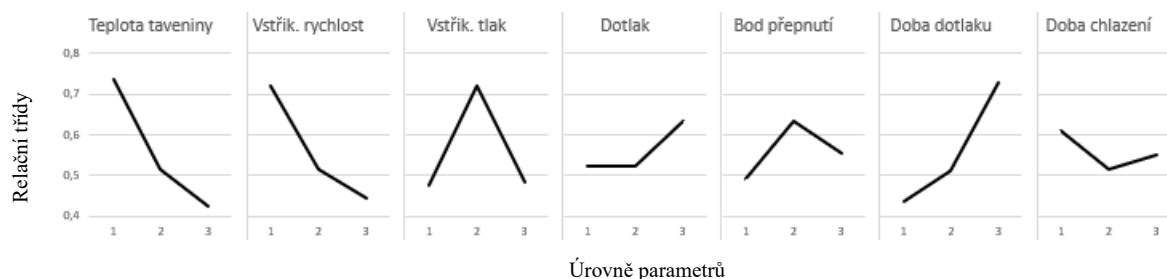
### 5.1.5 Kvantifikace vlivu změny technologických parametrů na kvalitu výrobku, Mosten GB 218

V tabulce 31 jsou uvedeny výsledky výpočtu vlivu jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku z materiálu Mosten GB 218 podle simulace procesu vstřikování.

Tabulka 31: Vliv jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku, Mosten GB 218, výsledky simulace

Označení parametru	Parametry	Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3	Vliv změny, [%]
A	Teplota taveniny	0,7381	0,5153	0,4253	21,9
B	Vstřik. rychlost	0,7195	0,5165	0,4427	17,3
C	Vstřik. tlak	0,4744	0,7195	0,4848	31,6
D	Dotlak	0,5229	0,5233	0,6325	3,4
E	Bod přepnutí	0,4916	0,6325	0,5546	4,2
F	Doba dotlaku	0,4359	0,5126	0,7302	19,7
G	Doba chlazení	0,6115	0,5165	0,5507	2,0

Experimentální data z tabulky 31 jsou graficky znázorněna na obrázku 35.



Obr. 35: Vliv jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku z materiálu Mosten GB 218, výsledky simulace

Z obrázku 35 je patrné, že zvýšení teploty taveniny a vstřikovací rychlosti vede k menším rozměrům a hmotnostem zkušebních tělísku. Naopak s růstem hodnoty a doby dotlaku dochází ke zlepšení kvality výrobku, tj. ke stálejším rozměrům a větším hmotnostem. U parametru doby chlazení došlo k objevení minima, které vyznačuje nejhorší hodnotu z hlediska kvality. Jak již bylo uvedeno, pro vstřikovací tlak se v průběhu úvodní simulace hledalo takové rozmezí hodnot, které by na grafu z obrázku 35 mělo jednoznačný pík. Rozměry a hmotnost zkušebních tělísek nejvíce ovlivňuje změna vstřikovacího tlaku: 31,6 %. Druhým nejvíce ovlivňujícím kvalitu faktorem je v daném případě doba dotlaku: 19,7 %. Dále následují teplota taveniny (21,9 %) a vstřikovací rychlost (17,3 %). Vliv změny ostatních parametrů leží v rozmezí pod 10 %.

K nejlepší kvalitě zkušebního tělíska přivede kombinace  $A_1, B_1, C_2, D_3, E_2, F_3, G_1$ : teplota taveniny 200 °C, vstřikovací rychlost 15 cm<sup>3</sup>/s, vstřikovací tlak 35 MPa, dotlak 25 MPa, bod přepnutí na dotlak 75 % vyplněného objemu dutiny formy, doba dotlaku 14 s, doba chlazení 10 s.

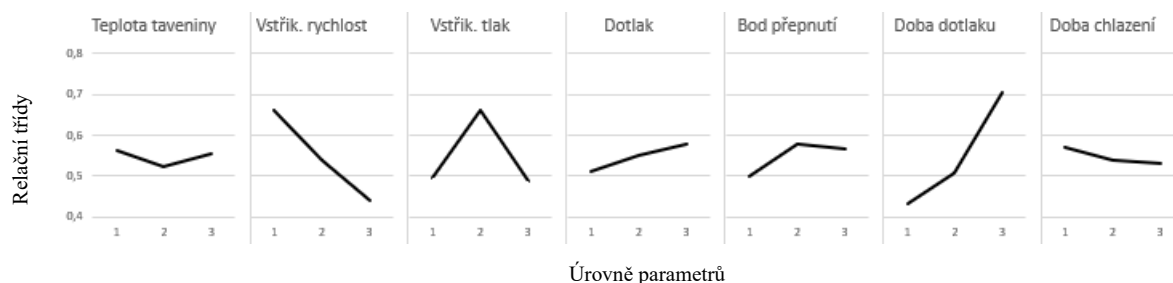
Z tabulky 31 a obrázku 35 je zřejmé, že kombinace parametrů  $A_3, B_3, C_1, D_1, E_1, F_1, G_2$  (teplota taveniny 240 °C, vstřikovací rychlost 35 cm<sup>3</sup>/s, vstřikovací tlak 30 MPa, dotlak 15 MPa, bod přepnutí na dotlak 70 % vyplněného objemu dutiny formy, doba dotlaku 6 s, doba chlazení 20 s) vykazuje nejnižší hodnoty relační třídy, tedy způsobí nejhorší kvalitu ve vybraných rozmezích technologických parametrů.

Stejným způsobem byl kvantifikován vliv technologických parametrů při reálném experimentu. V tabulce 32 jsou uvedeny výsledky výpočtu vlivu jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku z materiálu Mosten GB 218 podle reálného experimentu.

Tabulka 32: Vliv jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku, Mosten GB 218, výsledky reálného experimentu

Označení parametru	Parametry	Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3	Vliv změny, [%]
A	Teplota taveniny	0,5611	0,5248	0,5567	0,6
B	Vstřik. rychlost	0,6606	0,5403	0,4417	19,8
C	Vstřik. tlak	0,4936	0,6606	0,4884	41,0
D	Dotlak	0,5132	0,5516	0,5778	1,7
E	Bod přepnutí	0,4998	0,5778	0,5651	2,9
F	Doba dotlaku	0,4304	0,5069	0,7054	33,2
G	Doba chlazení	0,5707	0,5403	0,5317	0,7

Experimentální data z tabulky 32 jsou graficky znázorněna na obrázku 36.



Obr. 36: Vliv jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku z materiálu Mosten GB 218, výsledky reálného experimentu

V reálném experimentu se prokázal rozhodující vliv změny vstřikovacího tlaku, který činil 41,0 %. U vstřikovacího tlaku se prokazuje výsledek simulace, stejně tak hodnota vstřikovacího tlaku 35 MPa byla neoptimálnější a lze tedy konstatovat, že pomocí simulace byla definována neoptimálnější hodnota parametru, který nejvíc ovlivňuje kvalitu výrobků. Stejně jako v simulaci zvýšení vstřikovací rychlosti vede k menším rozměrům a hmotnostem zkušebních tělísku, větší a delší dotlak vede ke zlepšení kvality výrobku. Změna bodu přepnutí působí stejným způsobem jako v simulaci. Stejně jako v případě materiálu Mosten GB 002 se v reálu neprokával vliv teploty taveniny. Stejně jako v simulaci nejvíc ovlivňují kvalitu vstřikovací tlak (41,0 %), doba dotlaku (33,2 %). Vliv vstřikovací rychlosti (19,8 %) je třetí v pořadí kvůli tomu, že se neprokával vliv teploty taveniny (0,6 %).

V případě reálného experimentu s materiálem Mosten GB 218 je neoptimálnější kombinace parametrů  $A_1, B_1, C_2, D_3, E_2, F_3, G_1$ : teplota taveniny 200 °C, vstřikovací rychlost 15 cm<sup>3</sup>/s, vstřikovací tlak 35 MPa, dotlak 25 MPa, bod přepnutí na dotlak 75 % vyplněného objemu dutiny formy, doba dotlaku 14 s, doba chlazení 10 s. Kombinace parametrů  $A_2, B_3, C_3, D_1, E_1, F_1, G_3$  (teplota taveniny 220 °C, vstřikovací rychlost 35 cm<sup>3</sup>/s, vstřikovací tlak 40 MPa, dotlak 15 MPa, bod přepnutí na dotlak 70 % vyplněného objemu dutiny formy, doba dotlaku 6 s, doba chlazení 30 s) způsobí nejhorší kvalitu vyliisovaných tělísek.

V tabulce 33 jsou uvedeny výsledné parametry pro porovnání simulace a reálného experimentu.

Tabulka 33: Porovnání výsledných parametrů simulace a reálného experimentu, Mosten GB 218

Označení parametru	Parametry	Jednotky	Nejhorší kvalita		Nejlepší kvalita	
			Simulace	Experiment	Simulace	Experiment
A	Teplota taveniny	°C	240	220	200	200
B	Vstřik. rychlost	cm <sup>3</sup> /s	35	35	15	15
C	Vstřik. tlak	MPa	30,0	40,0	35,0	35,0
D	Dotlak	MPa	15,0	15,0	25,0	25,0
E	Bod přepnutí	% objemu	70	70	75	75
F	Doba dotlaku	s	6	6	14	14
G	Doba chlazení	s	20	30	10	10

S uvedenými technologickými parametry bylo provedeno vstřikování zkušebních tělísek. Výsledné parametry kvality po vstřikování s technologickými parametry s nejnižší relační třídou (nejhorší kvalita) jsou uvedeny v tabulce 34.

Tabulka 34: Porovnání výsledných parametrů simulace a reálného experimentu, nejmenší relační třída, Mosten GB 218

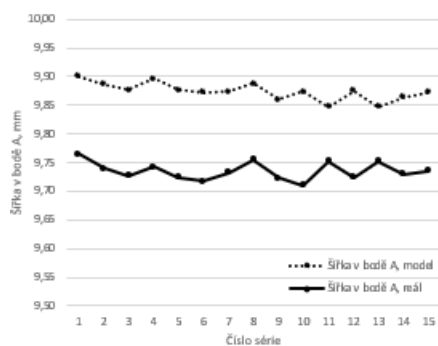
Zdroj výsledných parametrů	Série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
		Šířka středu v bodě A, [mm]	Tloušťka středu v bodě B, [mm]	Šířka okraje v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
Simulace	1	9,67	3,94	19,59	3,93	21,6130
	2	9,67	3,94	19,57	3,93	21,6195
Reál	1	9,65	3,94	19,54	3,93	21,4023
	2	9,65	3,94	19,53	3,93	21,3746

Výsledné parametry kvality po vstřikování s technologickými parametry s nejvyšší relační třídou (nejlepší kvalita) jsou uvedeny v tabulce 35.

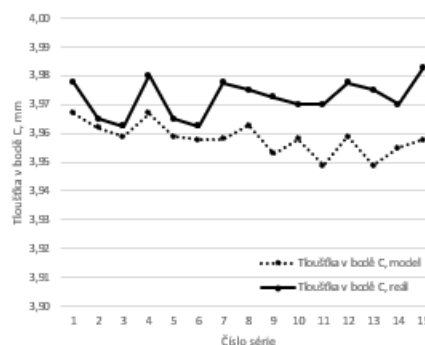
Tabulka 35: Porovnání výsledných parametrů simulace a reálného experimentu, nejvyšší relační třída, Mosten GB 218

Zdroj výsledných parametrů	Série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
		Šířka středu v bodě A, [mm]	Tloušťka středu v bodě B, [mm]	Šířka okraje v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
Simulace	1	9,85	3,98	19,67	3,98	22,4034
	2	9,83	3,98	19,68	3,97	22,3728
Reál	1	9,80	3,99	19,65	3,98	22,3565
	2	9,76	3,98	19,66	3,98	22,3901

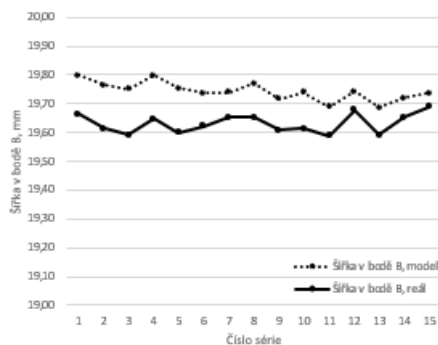
Výsledky z tabulky 35 lze považovat za maximální hodnoty parametrů kvality, tedy je to nejlepší kvalita, které lze dosáhnout v rámci vybraných rozmezí technologických parametrů. Každá změna jednotlivých parametrů v přijatých rozmezích bude způsobovat zhoršení jednoho nebo více parametrů kvality. Jak je vidět z tabulky 35 vyšších hodnot kvality výrobků lze dosáhnout jak s parametry určených simulací, tak s výslednými parametry reálného experimentu. Spolehlivost výsledků simulace se prokazuje i z grafů absolutních hodnot parametrů kvality. Na obrázku 37 jsou ukázány výsledky měření rozměrů po zchladnutí na pokojovou teplotu (23 °C) a na obrázku 38 jsou uvedeny výsledky měření hmotností tělíska.



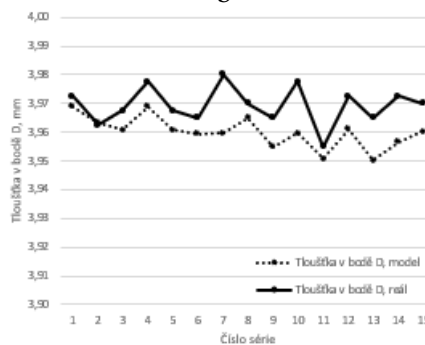
a



b

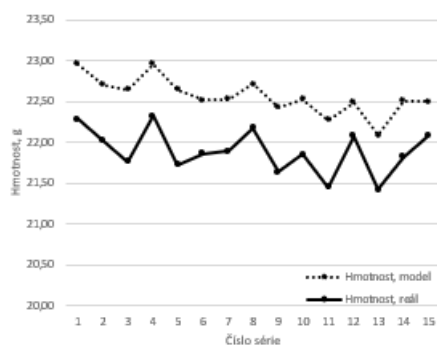


c



d

Obr. 37: Výsledky měření rozměrů tělíska, Mosten GB 218, šířka v bodě A (a), tloušťka v bodě C (b), šířka v bodě B (c), tloušťka v bodě D (d) po zchladnutí na pokojovou teplotu (23 °C)



Obr. 38: Výsledky měření hmotnosti tělíska, Mosten GB 218

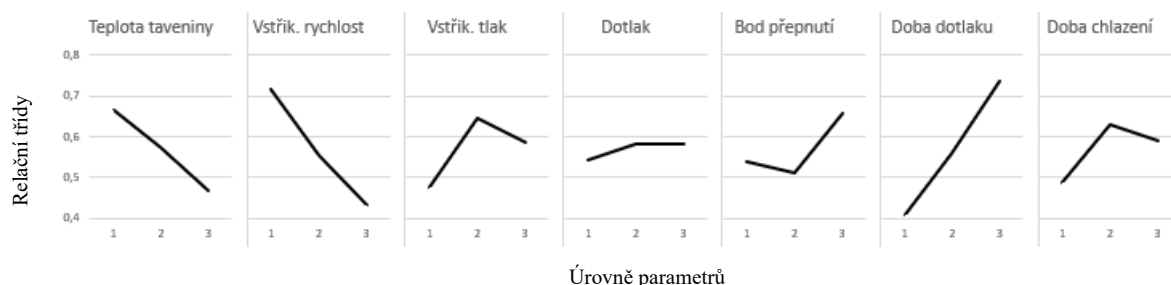
### 5.1.6 Kvantifikace vlivu změny technologických parametrů na kvalitu výrobku, Mosten MA 230

V tabulce 36 jsou uvedeny výsledky výpočtu vlivu jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku z materiálu Mosten MA 230 podle simulace procesu vstřikování.

Tabulka 36: Vliv jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku, Mosten MA 230, výsledky simulace

Označení parametru	Parametry	Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3	Vliv změny, [%]
A	Teplota taveniny	0,6646	0,5727	0,4682	8,9
B	Vstřik. rychlost	0,7170	0,5562	0,4323	18,7
C	Vstřik. tlak	0,4755	0,6446	0,5854	45,9
D	Dotlak	0,5413	0,5812	0,5830	0,5
E	Bod přepnutí	0,5380	0,5106	0,6569	0,6
F	Doba dotlaku	0,4073	0,5604	0,7379	25,1
G	Doba chlazení	0,4882	0,6286	0,5887	0,3

Experimentální data z tabulky 36 jsou graficky znázorněna na obrázku 39.



Obr. 39: Vliv jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku z materiálu Mosten MA 230, výsledky simulace

Z obrázku 39 je patrné, že zvýšení teploty taveniny a vstřikovací rychlosti vede k menším rozměrům a hmotnostem zkušebních tělísku. Naopak s růstem hodnoty a doby dotlaku dochází ke zlepšení kvality výrobku, tj. ke stálejším rozměrům a větším hmotnostem. Jak již bylo uvedeno, pro vstřikovací tlak se v průběhu úvodní simulace hledalo takové rozmezí hodnot, které by na grafu z obrázku 39 mělo jednoznačný pík. Rozměry a hmotnost zkušebních tělísek nejvíce ovlivňuje změna vstřikovacího tlaku: 45,9 %. Druhým nejvíce ovlivňujícím kvalitu faktorem je v daném případě doba dotlaku: 25,1 %. Třetí nejdůležitější parametr je vstřikovací rychlost: 18,7 %. Vliv změny ostatních parametrů leží v rozmezí pod 10 %.

K nejlepší kvalitě zkušebního tělíska přivede kombinace  $A_1, B_1, C_2, D_3, E_3, F_3, G_2$ : teplota taveniny 195 °C, vstřikovací rychlost 15 cm<sup>3</sup>/s, vstřikovací tlak 25 MPa, dotlak 15 MPa, bod přepnutí na dotlak 85 % vyplněného objemu dutiny formy, doba dotlaku 14 s, doba chlazení 20 s.

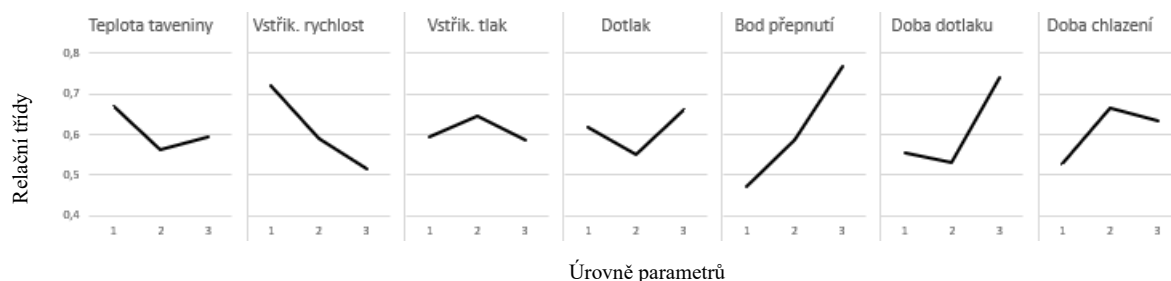
Z tabulky 35 a obrázku 39 je zřejmé, že kombinace parametrů  $A_3, B_3, C_1, D_1, E_2, F_1, G_1$  (teplota taveniny 225 °C, vstřikovací rychlost 35 cm<sup>3</sup>/s, vstřikovací tlak 20 MPa, dotlak 10 MPa, bod přepnutí na dotlak 80 % vyplněného objemu dutiny formy, doba dotlaku 6 s, doba chlazení 10 s) vykazuje nejnižší hodnoty relační třídy, tedy způsobí nejhorší kvalitu ve vybraných rozmezích technologických parametrů.

Stejným způsobem byl kvantifikován vliv technologických parametrů při reálném experimentu. V tabulce 37 jsou uvedeny výsledky výpočtu vlivu jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku z materiálu Mosten MA 230 podle reálného experimentu.

Tabulka 37: Vliv jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku, Mosten MA 230, výsledky reálného experimentu

Označení parametru	Parametry	Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3	Vliv změny, [%]
A	Teplota taveniny	0,6703	0,5627	0,5931	3,0
B	Vstřik. rychlost	0,7212	0,5902	0,5147	10,8
C	Vstřik. tlak	0,5925	0,6461	0,5874	55,5
D	Dotlak	0,6162	0,5494	0,6604	3,1
E	Bod přepnutí	0,4716	0,5854	0,7691	14,2
F	Doba dotlaku	0,5555	0,5308	0,7398	12,9
G	Doba chlazení	0,5262	0,6653	0,6346	0,5

Experimentální data z tabulky 37 jsou graficky znázorněna na obrázku 40.



Obr. 40: Vliv jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku z materiálu Mosten MA 230, výsledky reálného experimentu

V reálném experimentu se prokázal rozhodující vliv změny vstřikovacího tlaku, který činil 55,5 %. U vstřikovacího tlaku se prokazuje výsledek simulace, stejně tak hodnota vstřikovacího tlaku 25 MPa byla neoptimálnější a lze tedy konstatovat, že pomocí simulace byla definována neoptimálnější hodnota parametru, který nejvíc ovlivňuje kvalitu výrobků. Stejně jako v simulaci zvýšení vstřikovací rychlosti vede k menším rozměrům a hmotnostem zkušebních tělísku. Změna doby chlazení působí stejným způsobem jako v simulaci. Stejně jako v případě materiálu Mosten GB 002 a Mosten GB 218 parametr teploty taveniny ovlivnil kvalitu v menší míře než v simulaci, ale rozdíl mezi simulací a reálným experimentem byl tentokrát méně značný. Stejně jako v simulaci nejvíc ovlivňuje kvalitu vstřikovací tlak (55,5 %). Vliv bodu přepnutí byl v tomto případě větší než u předchozích materiálů (14,2 %) a lze to odůvodnit menšími absolutními hodnotami objemu při přepnutí než u předchozích materiálů, tedy všechny 3 úrovně bodu přepnutí byly vyšší (75, 80 a 85 % vyplněného objemu dutiny formy). Vliv doby dotlaku činil 12,9 %, vliv vstřikovací rychlosti činil 10,8 %.

V případě reálného experimentu s materiálem Mosten MA 230 je neoptimálnější kombinace parametrů  $A_1, B_1, C_2, D_3, E_3, F_3, G_2$ : teplota taveniny 195 °C, vstřikovací rychlost 15 cm<sup>3</sup>/s, vstřikovací tlak 25 MPa, dotlak 15 MPa, bod přepnutí na dotlak 85 % vyplněného objemu dutiny formy, doba dotlaku 14 s, doba chlazení 20 s. Kombinace parametrů  $A_2, B_3, C_3, D_2, E_1, F_2, G_1$  (teplota taveniny 210 °C, vstřikovací rychlost 35 cm<sup>3</sup>/s, vstřikovací tlak 30 MPa, dotlak 12,5 MPa, bod přepnutí na dotlak 75 % vyplněného objemu dutiny formy, doba dotlaku 10 s, doba chlazení 10 s) způsobí nejhorší kvalitu vylisovaných tělísek.

V tabulce 38 jsou uvedeny výsledné parametry pro porovnání simulace a reálného experimentu.

Tabulka 38: Porovnání výsledných parametrů simulace a reálného experimentu, Mosten MA 230

Označení parametru	Parametry	Jednotky	Nejhorší kvalita		Nejlepší kvalita	
			Simulace	Experiment	Simulace	Experiment
A	Teplota taveniny	°C	225	210	195	195
B	Vstřík. rychlost	cm <sup>3</sup> /s	35	35	15	15
C	Vstřík. tlak	MPa	20,0	30,0	25,0	25,0
D	Dotlak	MPa	10,0	12,5	15,0	15,0
E	Bod přepnutí	% objemu	80	75	85	85
F	Doba dotlaku	s	6	10	14	14
G	Doba chlazení	s	10	10	20	20



S uvedenými technologickými parametry bylo provedeno vstřikování zkušebních tělísek. Výsledné parametry kvality po vstřikování s technologickými parametry s nejnižší relační třídou (nejhorší kvalita) jsou uvedeny v tabulce 39.

Tabulka 39: Porovnání výsledných parametrů simulace a reálného experimentu, nejmenší relační třída, Mosten MA 230

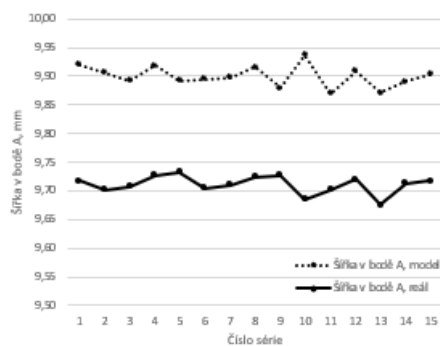
Zdroj výsledných parametrů	Série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
		Šířka středu v bodě A, [mm]	Tloušťka středu v bodě B, [mm]	Šířka okraje v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
Simulace	1	9,63	3,93	19,51	3,93	21,6795
	2	9,64	3,94	19,50	3,94	21,7176
Reál	1	9,64	3,94	19,51	3,94	21,7976
	2	9,64	3,94	19,51	3,93	21,7952

Výsledné parametry kvality po vstřikování s technologickými parametry s nejvyšší relační třídou (nejlepší kvalita) jsou uvedeny v tabulce 40.

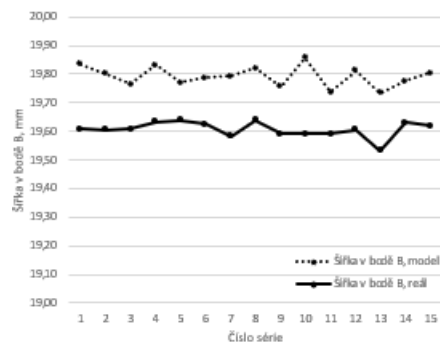
Tabulka 40: Porovnání výsledných parametrů simulace a reálného experimentu, nejvyšší relační třída, Mosten MA 230

Zdroj výsledných parametrů	Série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
		Šířka středu v bodě A, [mm]	Tloušťka středu v bodě B, [mm]	Šířka okraje v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
Simulace	1	9,74	3,98	19,65	3,99	22,5920
	2	9,77	3,97	19,65	3,98	22,5783
Reál	1	9,76	3,97	19,68	3,97	22,6860
	2	9,76	3,98	19,68	3,98	22,6925

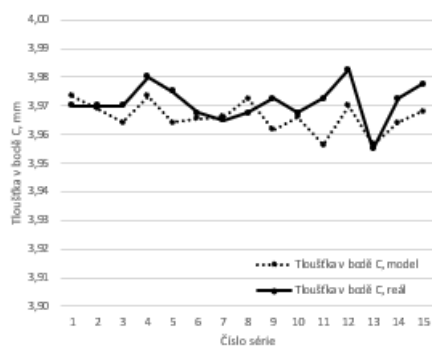
Výsledky z tabulky 40 lze považovat za maximální hodnoty parametrů kvality, tedy je to nejlepší kvalita, které lze dosáhnout v rámci vybraných rozmezí technologických parametrů. Každá změna jednotlivých parametrů v přijatých rozmezích bude způsobovat zhoršení jednoho nebo více parametrů kvality. Jak je vidět z tabulky 40 vyšších hodnot kvality výrobků lze dosáhnout jak s parametry určených simulací, tak s výslednými parametry reálného experimentu. Spolehlivost výsledků simulace se prokazuje i z grafů absolutních hodnot parametrů kvality. Na obrázku 41 jsou ukázány výsledky měření rozměrů po zchladnutí na pokojovou teplotu (23 °C) a na obrázku 42 jsou uvedeny výsledky měření hmotností tělíska.



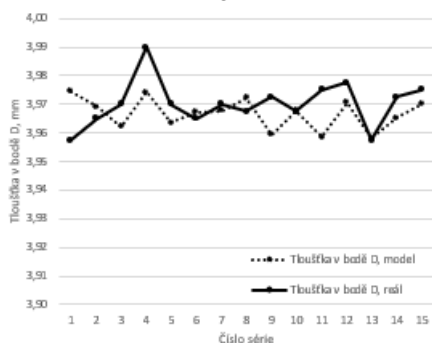
a



c

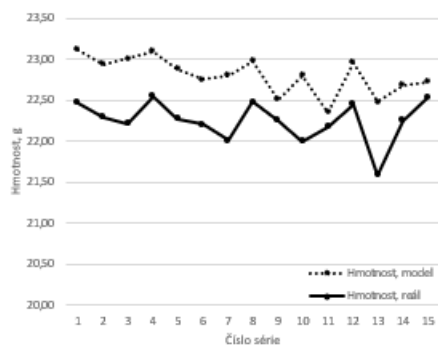


b



d

Obr. 41: Výsledky měření rozměrů tělíska, Mosten MA 230, šířka v bodě A (a), tloušťka v bodě C (b), šířka v bodě B (c), tloušťka v bodě D (d) po zchladnutí na pokojovou teplotu (23 °C)



Obr. 42: Výsledky měření hmotnosti tělíska, Mosten MA 230

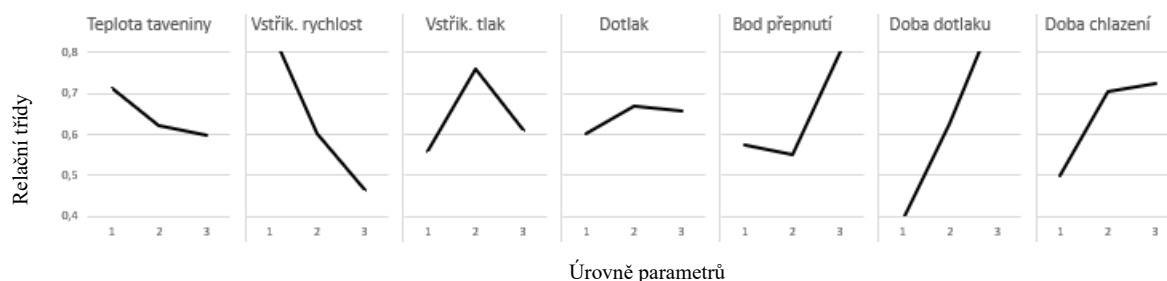
### 5.1.7 Kvantifikace vlivu změny technologických parametrů na kvalitu výrobku, Krasten PS GP 154

V tabulce 41 jsou uvedeny výsledky výpočtu vlivu jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku z materiálu Krasten PS GP 154 podle simulace procesu vstřikování.

Tabulka 41: Vliv jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku, Krasten PS GP 154, výsledky simulace

Označení parametru	Parametry	Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3	Vliv změny, [%]
A	Teplota taveniny	0,7113	0,6205	0,5987	1,6
B	Vstřik. rychlost	0,8666	0,6007	0,4633	19,4
C	Vstřik. tlak	0,5603	0,7610	0,6093	43,3
D	Dotlak	0,6016	0,6708	0,6581	0,6
E	Bod přepnutí	0,5737	0,5525	0,8044	1,9
F	Doba dotlaku	0,3932	0,6277	0,9097	30,9
G	Doba chlazení	0,4985	0,7064	0,7257	2,3

Experimentální data z tabulky 41 jsou graficky znázorněna na obrázku 43.



Obr. 43: Vliv jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku z materiálu Krasten PS GP 154, výsledky simulace

Z obrázku 43 je patrné, že zvýšení teploty taveniny a vstřikovací rychlosti vede k menším rozměrům a hmotnostem zkušebních tělísku. Růst doby dotlaku a doby chlazení zlepšuje kvalitu výrobků. Jak již bylo uvedeno, pro vstřikovací tlak se v průběhu úvodní simulace hledalo takové rozmezí hodnot, které by na grafu z obrázku 19 mělo jednoznačný pík. Optimálnější je doba chlazení 30 s, ale z důvodu malé převahy z hlediska kvality nad dobou chlazení 20 s, lze dobu chlazení zkrátit pro zkrácení celého cyklu vstřikování. Kvalitu zkušebních tělísek nejvíc ovlivňuje změna vstřikovacího tlaku: 43,3 %. Druhým nejvíce ovlivňujícím kvalitu faktorem je v daném případě doba dotlaku: 30,9 %. Třetí nejdůležitější parametr je vstřikovací rychlost: 19,4 %. Teplota taveniny oproti vstřikování PP působila výrazně méně již ve stadiu simulace. Vliv změny ostatních parametrů leží v rozmezí pod 10 %.

K nejlepší kvalitě zkušebního tělíska přivede kombinace  $A_1, B_1, C_2, D_2, E_3, F_3, G_3$ : teplota taveniny 220 °C, vstřikovací rychlost 20 cm<sup>3</sup>/s, vstřikovací tlak 35 MPa, dotlak 25 MPa, bod přepnutí na dotlak 85 % vyplněného objemu dutiny formy, doba dotlaku 14 s, doba chlazení 30 s.

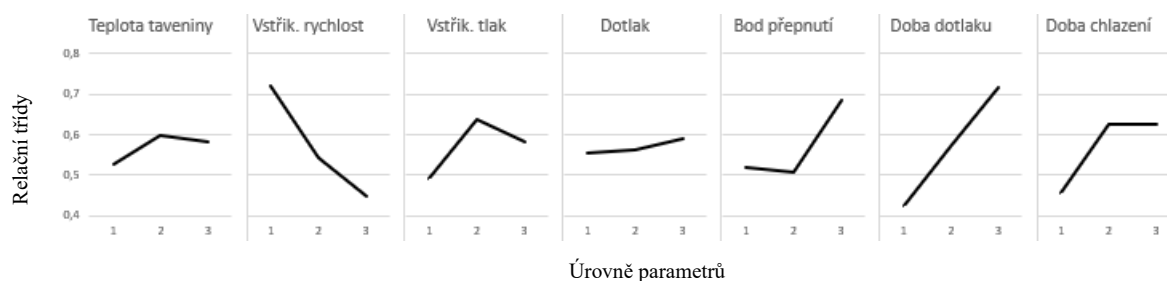
Z tabulky 41 a obrázku 43 je zřejmé, že kombinace parametrů  $A_3, B_3, C_1, D_1, E_2, F_1, G_1$  (teplota taveniny 240 °C, vstřikovací rychlost 40 cm<sup>3</sup>/s, vstřikovací tlak 30 MPa, dotlak 15 MPa, bod přepnutí na dotlak 80 % vyplněného objemu dutiny formy, doba dotlaku 6 s, doba chlazení 10 s) vykazuje nejnižší hodnoty relační třídy, tedy způsobí nejhorší kvalitu ve vybraných rozmezích technologických parametrů.

Stejným způsobem byl kvantifikován vliv technologických parametrů při reálném experimentu. V tabulce 42 jsou uvedeny výsledky výpočtu vlivu jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku z materiálu Krasten PS GP 154 podle reálného experimentu.

Tabulka 42: Vliv jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku, Krasten PS GP 154, výsledky reálného experimentu

Označení parametru	Parametry	Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3	Vliv změny, [%]
A	Teplota taveniny	0,5253	0,5998	0,5842	1,6
B	Vstřik. rychlost	0,7198	0,5433	0,4462	20,4
C	Vstřik. tlak	0,4928	0,6359	0,5807	50,7
D	Dotlak	0,5539	0,5641	0,5913	0,4
E	Bod přepnutí	0,5176	0,5074	0,6843	2,2
F	Doba dotlaku	0,4254	0,5689	0,7150	22,2
G	Doba chlazení	0,4561	0,6272	0,6261	2,5

Experimentální data z tabulky 42 jsou graficky znázorněna na obrázku 44.



Obr. 44: Vliv jednotlivých technologických parametrů na kvalitu výrobku z materiálu Krasten PS GP 154, výsledky reálného experimentu

V reálném experimentu se prokázal rozhodující vliv změny vstřikovacího tlaku, který činil 50,7 %. U vstřikovacího tlaku se prokazuje výsledek simulace, stejně tak hodnota vstřikovacího tlaku 35 MPa byla neoptimálnější. Stejně jako v simulaci zvýšení vstřikovací rychlosti vede k menším rozměrům a hmotnostem zkušebních tělísku. Změna vstřikovacího tlaku, bodu přepnutí na dotlak, doby dotlaku a doby chlazení působí stejným způsobem jako v simulaci. Stejně jako v simulaci nejvíc ovlivňuje kvalitu vstřikovací tlak (50,7 %). Vliv doby dotlaku činil 22,2 %, vliv vstřikovací rychlosti činil 20,4 %.

V případě reálného experimentu s materiálem Krasten PS GP 154 je neoptimálnější kombinace parametrů  $A_2, B_1, C_2, D_3, E_3, F_3, G_2$ : teplota taveniny 230 °C, vstřikovací rychlost 20 cm<sup>3</sup>/s, vstřikovací tlak 35 MPa, dotlak 25 MPa, bod přepnutí na dotlak 85 % vyplněného objemu dutiny formy, doba dotlaku 14 s, doba chlazení 20 s. Kombinace parametrů  $A_1, B_3, C_1, D_1, E_2, F_1, G_1$  (teplota taveniny 220 °C, vstřikovací rychlost 40 cm<sup>3</sup>/s, vstřikovací tlak 30 MPa, dotlak 15 MPa, bod přepnutí na dotlak 80 % vyplněného objemu dutiny formy, doba dotlaku 6 s, doba chlazení 10 s) způsobí nejhorší kvalitu vylisovaných tělísek.

V tabulce 43 jsou uvedeny výsledné parametry pro porovnání simulace a reálného experimentu.

Tabulka 43: Porovnání výsledných parametrů simulace a reálného experimentu, Krasten PS GP 154

Označení parametru	Parametry	Jednotky	Nejhorší kvalita		Nejlepší kvalita	
			Simulace	Experiment	Simulace	Experiment
A	Teplota taveniny	°C	240	220	220	230
B	Vstřik. rychlost	cm <sup>3</sup> /s	40	40	20	20
C	Vstřik. tlak	MPa	30,0	30,0	35,0	35,0
D	Dotlak	MPa	15,0	15,0	25,0	25,0
E	Bod přepnutí	% objemu	80	80	85	85
F	Doba dotlaku	s	6	6	14	14
G	Doba chlazení	s	10	10	30	20

S uvedenými technologickými parametry bylo provedeno vstřikování zkušebních tělísek. Výsledné parametry kvality po vstřikování s technologickými parametry s nejnižší relační třídou (nejhorší kvalita) jsou uvedeny v tabulce 44.

Tabulka 44: Porovnání výsledných parametrů simulace a reálného experimentu, nejmenší relační třída, Krasten PS GP 154

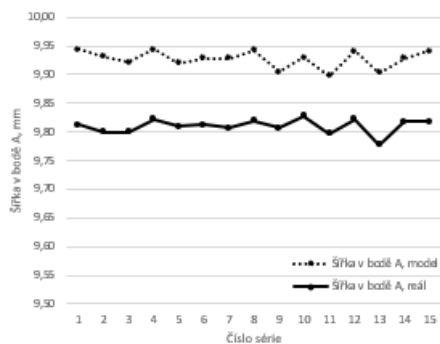
Zdroj výsledných parametrů	Série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
		Šířka středu v bodě A, [mm]	Tloušťka středu v bodě B, [mm]	Šířka okraje v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
Simulace	1	9,85	3,95	19,74	3,95	26,4030
	2	9,84	3,94	19,72	3,95	26,3260
Reál	1	9,87	3,96	19,77	3,95	26,7310
	2	9,85	3,95	19,78	3,95	26,7150

Výsledné parametry kvality po vstřikování s technologickými parametry s nejvyšší relační třídou (nejlepší kvalita) jsou uvedeny v tabulce 45.

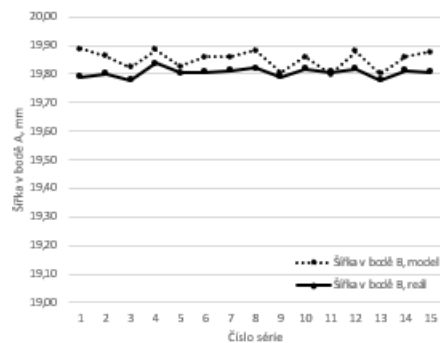
Tabulka 45: Porovnání výsledných parametrů simulace a reálného experimentu, nejvyšší relační třída, Krasten PS GP 154

Zdroj výsledných parametrů	Série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
		Šířka středu v bodě A, [mm]	Tloušťka středu v bodě B, [mm]	Šířka okraje v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
Simulace	1	9,94	3,98	19,89	3,98	27,5550
	2	9,93	3,99	19,87	3,98	27,6410
Reál	1	9,94	3,98	19,88	3,98	27,5260
	2	9,92	3,98	19,86	3,98	27,5980

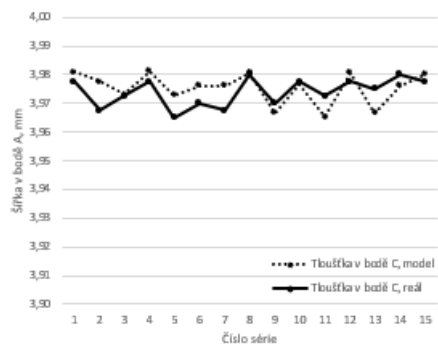
Výsledky z tabulky 45 lze považovat za maximální hodnoty parametrů kvality, tedy je to nejlepší kvalita, které lze dosáhnout v rámci vybraných rozmezí technologických parametrů. Každá změna jednotlivých parametrů v přijatých rozmezích bude způsobovat zhoršení jednoho nebo více parametrů kvality. Jak je vidět z tabulky 45 vyšších hodnot kvality výrobků lze dosáhnout jak s parametry určených simulací, tak s výslednými parametry reálného experimentu. Spolehlivost výsledků simulace se prokazuje i z grafů absolutních hodnot parametrů kvality. Na obrázku 45 jsou ukázány výsledky měření rozměrů po zchladnutí na pokojovou teplotu (23 °C) a na obrázku 46 jsou uvedeny výsledky měření hmotností tělíska.



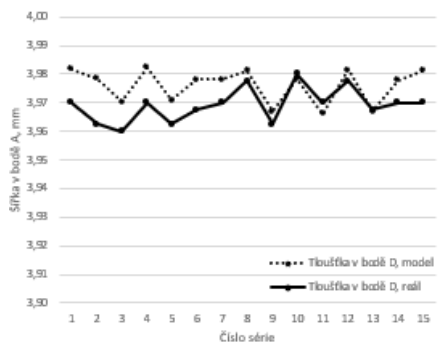
a



c

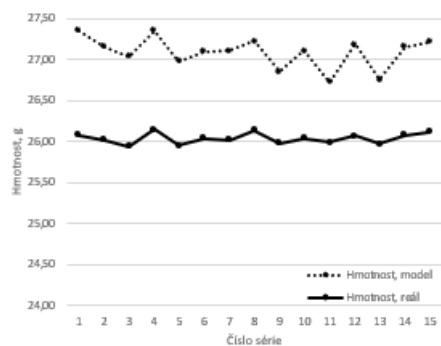


b



d

Obr. 45: Výsledky měření rozměrů tělíska, Krasten PS GP 154, šířka v bodě A (a), tloušťka v bodě C (b), šířka v bodě B (c), tloušťka v bodě D (d) po zchlazení na pokojovou teplotu (23 °C)



Obr. 46: Výsledky měření hmotnosti tělíska, Krasten PS GP 154

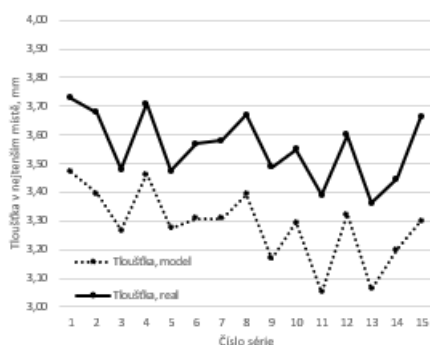
## 5.2 Výsledky analýzy propadlin na zkušebním tělísku

V bodě 4.7 diplomové práce byla popsána provedená analýza propadlin na tělískách z materiálů Mosten GB 002 a Mosten GB 218. U reálných výlisků byly tloušťky měřeny ve stejném bodě jako u modelu, tedy v nejširší části blízko vtoku. Výsledky analýzy propadlin v simulaci a v reálném experimentu pro materiál Mosten GB 002 jsou uvedeny v tabulce 46.

Tabulka 46: Porovnání výsledků analýzy propadlin v simulaci a v reálném experimentu, Mosten GB 002

Číslo série	Výsledky simulace	Výsledky reálného experimentu	
	Tloušťka v nejtenčím místě, [mm]	Tloušťka v nejtenčím místě, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
1	3,472	3,729	0,017
2	3,396	3,679	0,018
3	3,268	3,481	0,008
4	3,464	3,709	0,010
5	3,276	3,474	0,007
6	3,308	3,570	0,018
7	3,308	3,581	0,045
8	3,392	3,670	0,012
9	3,168	3,488	0,007
10	3,296	3,549	0,011
11	3,052	3,391	0,024
12	3,324	3,601	0,037
13	3,064	3,363	0,017
14	3,200	3,446	0,019
15	3,300	3,663	0,026

Výsledky z tabulky 46 znázorňuje obrázek 47.



Obr. 47: Porovnání výsledků analýzy propadlin v simulaci a v reálném experimentu, Mosten GB 002

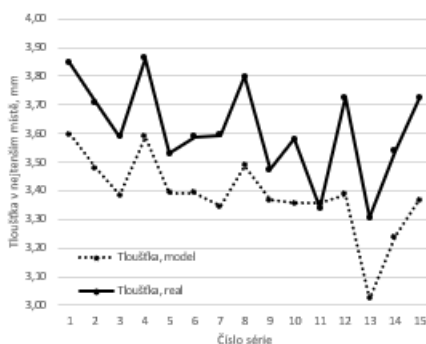


Výsledky analýzy propadlin v simulaci a v reálném experimentu pro materiál Mosten GB 218 jsou uvedeny v tabulce 47.

Tabulka 47: Porovnání výsledků analýzy propadlin v simulaci a v reálném experimentu, Mosten GB 218

Číslo série	Výsledky simulace	Výsledky reálného experimentu	
	Tloušťka v nejtenčím místě, [mm]	Tloušťka v nejtenčím místě, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
1	3,596	3,845	0,019
2	3,480	3,708	0,028
3	3,384	3,590	0,034
4	3,588	3,863	0,028
5	3,392	3,530	0,022
6	3,392	3,588	0,014
7	3,344	3,595	0,023
8	3,488	3,798	0,016
9	3,368	3,474	0,027
10	3,356	3,580	0,008
11	3,356	3,340	0,023
12	3,388	3,726	0,023
13	3,024	3,305	0,054
14	3,240	3,538	0,029
15	3,368	3,723	0,027

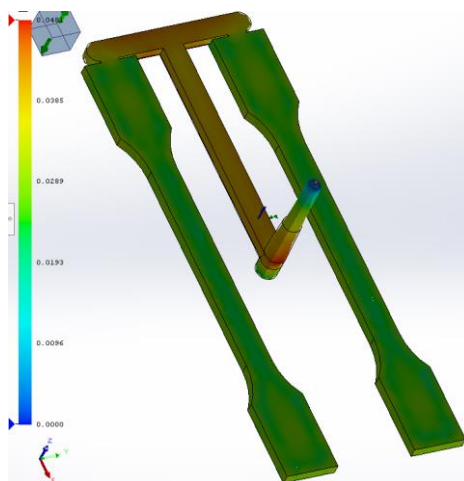
Výsledky z tabulky 47 znázorňuje obrázek 48.



Obr. 48: Porovnání výsledků analýzy propadlin v simulaci a v reálném experimentu, Mosten GB 218

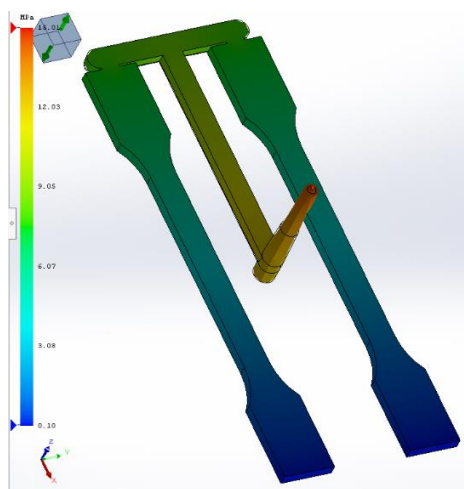
U výlisků z materiálů Mosten GB 002 a Mosten GB 218 k nejhlubším propadlinám docházelo v blízkosti vtoku. V bodě 5.1.4 a 5.1.5 byly definovány optimální technologické parametry pro jednotlivé materiály a u tělísek vyrobených za daných parametrů byly měřeny tloušťky v nejtenčích místech. Tloušťka v nejtenčím místě činila  $3,671 \pm 0,020$  mm u výlisků z materiálu Mosten GB 002 a  $3,791 \pm 0,005$  mm u výlisků z materiálu Mosten GB 218.

Materiál Mosten MA 230 byl taky hodnocen z hlediska výskytu propadlin. Na obrázku 49 je znázorněn výsledek analýzy propadlin pro materiál Mosten MA 230.



Obr. 49: Výsledek analýzy propadlin v SOLIDWORKS Plastics, Mosten MA 230,  $T_f$  195 °C,  $V_v$  15 cm<sup>3</sup>/s,  $p_v$  25 MPa,  $p_d$  15 MPa,  $b_p$  85 % vyplněného objemu,  $t_d$  14 s,  $t_{ch}$  20 s

Profil propadlin je oproti materiálům Mosten GB 002 a Mosten GB 218 rovnoměrný a objevilo se, že nejtenčími místy u výlisků z materiálu Mosten MA 230 jsou oblasti v nejvzdálenějších místech od vtoku. Tloušťka výlisků činila  $3,992 \pm 0,005$  mm v blízkosti vtoku  $3,865 \pm 0,007$  mm na konci výlisků. Výsledky simulace ukazují, že u výlisků z materiálu Mosten MA 230 se tloušťka nejtenčí části řídí ne velikostí propadlin, ale celkovým objemovým smrštěním v důsledku menších hodnot tlaků na konci plnění. Výsledek analýzy tlaku na konci plnění je ukázán na obrázku 50.



Obr. 50: Výsledek analýzy tlaku na konci plnění v SOLIDWORKS Plastics, Mosten MA 230,  $T_f$  195 °C,  $V_v$  15 cm<sup>3</sup>/s,  $p_v$  25 MPa,  $p_d$  15 MPa,  $b_p$  85 % vyplněného objemu,  $t_d$  14 s,  $t_{ch}$  20 s

## 6 ZÁVĚR

V diplomové práci byly optimalizovány technologické parametry injekčního vstřikování pro výrobu zkušebních tělísek typu 1A ze 4 materiálů: Mosten GB 002, Mosten GB 218, Mosten MA 230 a Krasten PS GP 154. Pro optimalizaci parametrů byl použit software pro vstřikování plastů SOLIDWORKS Plastics. Software SOLIDWORKS Plastics je užitečným nástrojem k předpovědi objemového smrštění, výchylek rozměrů a hmotností výrobků za různých technologických parametrů procesu. Integrace metody DOE a numerického zpracování dat GRA poskytuje systematický a efektivní přístup k optimalizaci technologických parametrů vstřikování za současného snížení počtu provedených experimentů. Předpověď a vizualizace procesu vstřikování v předvýrobní fázi pomocí simulace snižuje výrobní náklady a minimalizuje potenciální výskyt vad výrobků.

Provedením experimentu byly definovány optimální z hlediska kvality technologické parametry. Pro každý ze 4 materiálů bylo současně regulováno 7 technologických parametrů a jejich vliv na 5 kvalitativních charakteristik. Pro optimalizaci byly regulovány parametry: teplota taveniny, vstřikovací rychlost, vstřikovací tlak, dotlak, bod přepnutí na dotlak, doba, dotlaku a doba chlazení. K optimalizaci bylo použito ortogonálního pole  $L_{15}(3^7)$ . Bylo prokázáno, že aplikovaná metoda DOE s numerickým zpracováním dat GRA je obecně vhodná pro optimalizaci technologických parametrů vstřikování a lze danou metodou optimalizovat jiné parametry, např. mechanické vlastnosti výrobků.

V tabulce 48 jsou uvedeny optimální parametry pro materiály Mosten GB 002 a Mosten GB 218 podle výsledků simulace a reálného experimentu.

Tabulka 48: Přehled optimálních parametrů pro materiály Mosten GB 002 a Mosten GB 218

Označení parametru	Parametry	Jednotky	Materiál			
			Mosten GB 002		Mosten GB 218	
			Simulace	Experiment	Simulace	Experiment
A	Teplota taveniny	°C	220	240	200	200
B	Vstřik. rychlost	cm <sup>3</sup> /s	20	20	15	15
C	Vstřik. tlak	MPa	50,0	50,0	35,0	35,0
D	Dotlak	MPa	35,0	30,0	25,0	25,0
E	Bod přepnutí	% objemu	70	65	75	75
F	Doba dotlaku	s	14	14	14	14
G	Doba chlazení	s	10	30	10	10

V tabulce 49 jsou uvedeny optimální parametry pro materiály Mosten MA 230 a Krasten PS GP 154 podle výsledků simulace a reálného experimentu.

Tabulka 48: Přehled optimálních parametrů pro materiály Mosten MA 230 a Krasten PS GP 154

Označení parametru	Parametry	Jednotky	Materiál			
			Mosten MA 230		Krasten PS GP 154	
			Simulace	Experiment	Simulace	Experiment
A	Teplota taveniny	°C	195	195	220	230
B	Vstřík. rychlost	cm <sup>3</sup> /s	15	15	20	20
C	Vstřík. tlak	MPa	25,0	25,0	35,0	35,0
D	Dotlak	MPa	15,0	15,0	25,0	25,0
E	Bod přepnutí	% objemu	85	85	85	85
F	Doba dotlaku	s	14	14	14	14
G	Doba chlazení	s	20	20	30	20

Z tabulek 48 a 49 je patrná shoda výsledků simulace a reálného vstřikování. Podle výsledků diplomové práce nejkritičtějšími parametry jsou vstřikovací tlak, vstřikovací rychlost a doba dotlaku. U daných parametrů byla prokázána 100 % shoda výsledků simulace a reálných experimentů. Výsledky diplomové práce prokázaly, že kvalitu výlisků lze optimalizovat jak pomocí reálného experimentu, tak pomocí simulace vstřikování. V případě simulace procesu není nutné provedení celého optimalizačního experimentu, lze pouze ověřit oblast výsledných hodnot simulace. Kvalita dosažená pomocí simulace je srovnatelná s výsledky reálného vstřikování.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] TANG, S. H., TAN, Y. J., SAPUAN, S. M., SULAIMAN, S., ISMAIL, N., SAMIN, R. (2007). *The use of Taguchi method in the design of plastic injection mould for reducing warpage*. Journal of Materials Processing Technology, 182 (2007) 418–426.
- [2] HARPER, C.A., *Modern Plastic Handbook*. Mc Graw Hill Publishers, 2000. ISBN: 9780070267145.
- [3] ZHAO, P., ZHOU, H., LI, Y., LI, D. *Process parameters optimization of injection molding using a fast strip analysis as a surrogate model*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 49 (2009), 949–959.
- [4] MIRANDA, D. A. NOGUEIRA, A. L. *Simulation of an Injection Process Using a CAE Tool: Assessment of Operational Conditions and Mold Design on the Process Efficiency*. Mat. Res. [online]. 2019, roč. 22, č. 2 [cit. 2021-05-12]. ISSN 1980-5373 Dostupné z: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392019000200212&tlng=en](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392019000200212&tlng=en).
- [5] GOODSHIP, V., MIDDLETON, B., CHERRINGTON, R. *Design and Manufacture of Plastic. Components for Multifunctionality. Structural Composites, Injection Molding, and 3D Printing*. Chadds Ford, PA, USA. Plastics design library, 2016.
- [6] TODD, R. *Manufacturing Processes Reference Guide*. New York, USA. Industrial Press, Inc, 1994. ISBN: 9780831130497.
- [7] ROSATO, D.V., ROSATO, M. G. *Injection molding handbook*. 3rd ed. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. ISBN 978-1-4613-7077-2.
- [8] BOBEK, J. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů*. Střední odborné učiliště Svitavy, 2013. ISBN: 978-80-88058-15-1.
- [9] ZHOU, H. *Computer modeling for injection molding*. Wiley, Inc. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, China, 2013. ISBN: 978-0-470-60299-7.
- [10] KHOSHOOEE, N., COATES, P. D. *Application of the Taguchi method for consistent polymer melt production in injection moulding*. IRC in Polymer Science and Technology, Department of Manufacturing Engineering, University of Bradford, 1998.
- [11] KREBS, J. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2001. ISBN 80-7083-449-8.

- [12] WANG, J. *PVT Properties of Polymers for Injection Molding*. School of Chemical Engineering and Environment, Beijing Institute of Technology, China.. [online] 2012, [cit. 2021-05-12]. ISBN: 978-953-51-0297-7, InTech, Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/some-critical-issues-for-injection-molding/measurements-of-polymer-pvtproperties-for-injection-molding>.
- [13] *Polypropylene Global Market Report*, 2020. The Business Research Company. London, United Kingdom.
- [14] TRIPATHI, D. *Practical guide to polypropylene*. RAPRA Technology, Shrewsbury, 2001. ISBN 978-1859572825.
- [15] MAIER, C., CALAFUT, T. *Polypropylene: the definitive user's guide and databook*. William Andrew. p. 14, 1998. ISBN 978-1-884207-58-7.
- [16] *The Definitive Guide to Polypropylene (PP)*. omnexus.specialchem.com [online]. 2008 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polypropylene-pp-plastic#uses>.
- [17] MAUL, J., FRUSHOUR, B. G., KONTOFF, J. R., EICHENAUER, H. OTT, K.-H., SCHADE, C. *Polystyrene and Styrene Copolymers*, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH, Weinheim, 2007. doi:10.1002/14351007.a21\_115.pub2.
- [18] MIHAI, M., HUNEALT, M. A., FAVIS, B. D. *Foaming of Polystyrene. Thermoplastic Starch Blends*. Journal of Cellular Plastics. 43 (3): 215–231. 2011. doi:10.1177/0021955X07071532. S2CID 135918555.
- [19] *Polystyrene*. chemicalsafetyfacts.org [online]. 2011 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://www.chemicalsafetyfacts.org/polystyrene/#:~:text=As%20a%20hard%2C%20solid%20plastic,pots%20and%20equipment%20and%20more>.
- [20] LENFELD, P. *Technologie vstřikování*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. ISBN 978-80-88058-74-8.
- [21] NEUHAUSL, E. *Vady výstřiků – 1. díl: Příčiny vzniku vad a studené spoje*. mmspektrum.com [online]. 2010 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-1-dil-priciny-vzniku-vad-a-studene-spoje.html>.
- [22] ULÍK, J. *Monitorovanie priebehu tlaku v nástroji pri vstrekovani plastov*. Disertační práce, Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2005.

- [23] PŮTA, J. *Řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje*. Disertační práce, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008.
- [24] WEINLICH, P. *Rozměrové změny matric PP s nanoplínem*. Disertační práce, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008.
- [25] NIRKHE, C.P., BARRY, C.M.F., *Comparison of approaches for optimizing molding parameters*. SPE Annual Technical Conference—ANTEC, Conference Proceedings. 2003. Nashville, TN, USA: Society of Plastics Engineers. 3534–3538.
- [26] TURNG, L.S., PEIC, M. *Computer aided process and design optimization for injection moulding*. Journal of Engineering Manufacture Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2002. 216(12): 1523–1532.
- [27] LAM, Y.C., BRITTON, G.A., DENG, Y.M. *A computer-aided system for an optimal moulding conditions design using a simulation-based approach*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003. 22(7–8): 574–586.
- [28] TAGUCHI, G. *Systems of Experimental Design*, Kraus and ASI, New York, 1991.
- [29] LAL, S. K., VASUDEVAN, H. *Optimization of Injection Moulding Process Parameters in the Moulding of Low Density Polyethylene (LDPE)*. International Journal of Engineering Research and Development, vol. 7, is. 5.
- [30] CHEN, W. L. *Finding efficient frontier of process parameters for plastic injection molding*. Journal of Industrial Engineering International. 2013. doi:10.1186/2251-712X-9-25.
- [31] PACKIANATHER, M. *Optimisation of micro injection moulding process through design of experiments*. IMME, School of Engineering, Cardiff University, Queens Buildings, The Parade, Cardiff, UK, 2013.
- [32] MATHIVANAN, D. *Minimization of sink mark defects in injection molding process – Taguchi approach*. International Journal of Engineering, Science and Technology, vol. 2, no. 2, 2010. ISSN: 2141-2839.
- [33] KAVADE, M. V., KADAM, S. D. *Parameter Optimization of Injection Molding of Polypropylene by using Taguchi Methodology*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2012, vol. 4, is. 4, PP 49-58, ISSN: 2278-1684.
- [34] SKOURLIS, T. P., MOHAPATRA, B., CHASSAPIS, C. *Evaluation of the effect of processing parameters on the properties of advanced styrenic resins: A design of experiments approach*. Advances in Polymer Technology, 1997. 16(2): 117–128.

- [35] HEINISCH, J., LOCKNER, Y., HOPMANN, C. *Comparison of design of experiment methods for modeling injection molding experiments using artificial neural networks*. Journal of Manufacturing Processes, vol. 61, 2021, pp. 357-368.
- [36] TSAI, K. M., HSIEH, C. Y., LO, W. C. *A study of the effects of process parameters for injection molding on surface quality of optical lenses*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 209, is. 7, 2009, pp. 3469-3477.
- [37] LIAO, S.J., CHANG, D.Y., CHEN, H.J. *Optimal process conditions of shrinkage and warpage of thin-wall parts*. Polymer Engineering and Science, 2004. 44(5): 917–928.
- [38] PUJARI, G. V., NAIK, V. R. *Process parameters optimization for development of defect free injection molded component*. International Journal of Science Technology and Management. vol. 4, is. 10, 2015. ISSN 2394-1537.
- [39] KUHMAN, K., EHRENSTEIN, G. W., *Off-line Optimization of the Injection Molding Process Considering Regrinds*, SPE Annual Technical Conference—ANTEC, Conference Proceedings. 1996, Indianapolis, Indiana, USA: Society of Plastics Engineers. 826–830.
- [40] MEHAT, N. M., KAMARUDDIN, S., OTHMAN, A. R. *Modeling and Analysis of Injection Moulding Process Parameters for Plastic Gear Industry Application*. Department of Mould Technology, International Scholarly Research Notices, vol. 2013, Article ID 869736, 10 pages, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/869736>.
- [41] CHANG, S. H., HWANG, J. R., DOONG, J. L. *Optimization of the injection molding process of short glass fiber reinforced polycarbonate composites using grey relational analysis*. Journal of Materials Processing Technology, 2000. 97(1–3): 186–193.
- [42] *Mosten GB 002. Technický list*. [online]. 2020 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: [https://www.unipetrolrpa.cz/CS/NabidkaProduktu/petrochemicke-produkty/polyolefiny/Documents/Specification/cs/Technical%20datasheet%20Mosten\\_TB%2002\\_cz.pdf](https://www.unipetrolrpa.cz/CS/NabidkaProduktu/petrochemicke-produkty/polyolefiny/Documents/Specification/cs/Technical%20datasheet%20Mosten_TB%2002_cz.pdf).
- [43] *Mosten GB 218. Technický list*. [online]. 2020 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: [https://www.unipetrol.cz/cs/NabidkaProduktu/PetrochemickeProdukty/Polyolefiny/Technical%20datasheet/Technical%20datasheet%20Mosten\\_GB%20218\\_cz.pdf](https://www.unipetrol.cz/cs/NabidkaProduktu/PetrochemickeProdukty/Polyolefiny/Technical%20datasheet/Technical%20datasheet%20Mosten_GB%20218_cz.pdf).
- [44] *Mosten MA 230. Technický list*. [online]. 2020 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: [https://www.unipetrol.cz/cs/NabidkaProduktu/PetrochemickeProdukty/Polyolefiny/Technical%20datasheet/Technical%20datasheet%20Mosten\\_MA%20230\\_cz.pdf](https://www.unipetrol.cz/cs/NabidkaProduktu/PetrochemickeProdukty/Polyolefiny/Technical%20datasheet/Technical%20datasheet%20Mosten_MA%20230_cz.pdf).



- [45] *Krasten PS GP 154. Technický list.* [online]. 2018 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: [https://www.synthosps.com/fileadmin/user\\_files/ps/pdf/1/TDS\\_GP\\_154\\_CS.pdf](https://www.synthosps.com/fileadmin/user_files/ps/pdf/1/TDS_GP_154_CS.pdf).
- [46] *Mosten.* [online]. 2019 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://www.pp-mosten.cz/product/mosten>.
- [47] *ALLROUNDER 320 C GOLDEN EDITION.* [online]. 2019 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: [https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische\\_Daten/ARBURG\\_ALLROUNDER\\_320C\\_GOLDEN\\_EDITION\\_TD\\_523871\\_en\\_GB.pdf](https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische_Daten/ARBURG_ALLROUNDER_320C_GOLDEN_EDITION_TD_523871_en_GB.pdf).
- [48] ISO 527-2: 2012. *Plastics — Determination of tensile properties — Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics.* ISO/TC 61/SC 2 Mechanical behavior, 2012. 11 s.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

3D	Trojdimenzionální
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ANOVA	Analysis of Variance
$b_p$	Bod přepnutí
CAE	Computer Aided Engineering
DOE	Design of Experiment
$F_U$	Uzavírací síla
GRA	Gray Relational Analysis
GRC	Gray Relational Coefficient
GRG	Gray Relational Grade
HDPE	Vysokohustotní polyetylen
HIPS	Houževnatý polystyren
ITT	Index toku taveniny
LDPE	Nízkohustotní polyetylen
$p$	Tlak
PA	Polyamid
PBT	Polybutylentereftalát
PE	Polyetylen
PET	Polyethylentereftalát
PC	Polykarbonát
$p_d$	Dotlak
$p_i$	Tlak v dutině formy
PMMA	Polymethylmethakrylát
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PTFE	Polytetrafluorethylen
$p_v$	Vstřikovací tlak
PVC	Polyvinylchlorid

S	Plocha výrobku
SBS	Kopolymer styren-butadien-styren
T	Teplota
$t_d$	Doba dotlaku
$T_g$	Teplota skelného přechodu
$t_{ch}$	Doba chlazení
$t_m$	Manipulační doba
$t_{pl}$	Doba plastikace
$t_{s1}$	Čas na zavření vstřikovací formy
$t_{s2}$	Čas přisunutí a odsunutí
$t_{s3}$	Čas na otevření vstřikovací formy
$T_t$	Teplota taveniny
$t_v$	Doba vstřikování
v	Měrný objem (převrácená hodnota hustoty)
$V_v$	Vstřikovací rychlost

## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1: Výsledky měření šířky v bodě A po reálném experimentu, Mosten GB 002.
- Příloha 2: Výsledky měření šířky v bodě B po reálném experimentu, Mosten GB 002.
- Příloha 3: Výsledky měření tloušťky v bodě C po reálném experimentu, Mosten GB 002.
- Příloha 4: Výsledky měření tloušťky v bodě D po reálném experimentu, Mosten GB 002.
- Příloha 5: Výsledky měření hmotnosti zkušebního tělíska po reálném experimentu, Mosten GB 002.
- Příloha 6: Výsledky parametrů kvality po simulaci vstřikování, Mosten GB 218.
- Příloha 7: Výsledky měření šířky v bodě A po reálném experimentu, Mosten GB 218.
- Příloha 8: Výsledky měření šířky v bodě B po reálném experimentu, Mosten GB 218.
- Příloha 9: Výsledky měření tloušťky v bodě C po reálném experimentu, Mosten GB 218.
- Příloha 10: Výsledky měření tloušťky v bodě D po reálném experimentu, Mosten GB 218.
- Příloha 11: Výsledky měření hmotnosti zkušebního tělíska po reálném experimentu, Mosten GB 218.
- Příloha 12: Hodnoty parametrů kvality jednotlivých sérií po reálném experimentu, Mosten GB 218.
- Příloha 13: Přepracované výsledky simulace procesu vstřikování, Mosten GB 218.
- Příloha 14: Přepracované výsledky reálného vstřikování, Mosten GB 218.
- Příloha 15: Výsledky výpočtů relačních koeficientu a relačních tříd po simulaci, Mosten GB 218.
- Příloha 16: Výsledky výpočtů relačních koeficientu a relačních tříd po reálném experimentu, Mosten GB 218.
- Příloha 17: Výsledky parametrů kvality po simulaci vstřikování, Mosten MA 230.
- Příloha 18: Výsledky měření šířky v bodě A po reálném experimentu, Mosten MA 230.
- Příloha 19: Výsledky měření šířky v bodě B po reálném experimentu, Mosten MA 230.
- Příloha 20: Výsledky měření tloušťky v bodě C po reálném experimentu, Mosten MA 230.
- Příloha 21: Výsledky měření tloušťky v bodě D po reálném experimentu, Mosten MA 230.
- Příloha 22: Výsledky měření hmotnosti zkušebního tělíska po reálném experimentu, Mosten MA 230.

- Příloha 23: Hodnoty parametrů kvality jednotlivých sérií po reálném experimentu, Mosten MA 230.
- Příloha 24: Přeprocessované výsledky simulace procesu vstřikování, Mosten MA 230.
- Příloha 25: Přeprocessované výsledky reálného vstřikování, Mosten MA 230.
- Příloha 26: Výsledky výpočtů relačních koeficientu a relačních tříd po simulaci, Mosten MA 230.
- Příloha 27: Výsledky výpočtů relačních koeficientu a relačních tříd po reálném experimentu, Mosten MA 230.
- Příloha 28: Výsledky parametrů kvality po simulaci vstřikování, Krasten PS GP 154.
- Příloha 29: Výsledky měření šířky v bodě A po reálném experimentu, Krasten PS GP 154.
- Příloha 30: Výsledky měření šířky v bodě B po reálném experimentu, Krasten PS GP 154.
- Příloha 31: Výsledky měření tloušťky v bodě C po reálném experimentu, Krasten PS GP 154.
- Příloha 32: Výsledky měření tloušťky v bodě D po reálném experimentu, Krasten PS GP 154.
- Příloha 33: Výsledky měření hmotnosti zkušebního tělíska po reálném experimentu, Krasten PS GP 154.
- Příloha 34: Hodnoty parametrů kvality jednotlivých sérií po reálném experimentu, Krasten PS GP 154.
- Příloha 35: Přeprocessované výsledky simulace procesu vstřikování, Krasten PS GP 154.
- Příloha 36: Přeprocessované výsledky reálného vstřikování, Krasten PS GP 154.
- Příloha 37: Výsledky výpočtů relačních koeficientu a relačních tříd po simulaci, Krasten PS GP 154.
- Příloha 38: Výsledky výpočtů relačních koeficientu a relačních tříd po reálném experimentu, Krasten PS GP 154.

# PŘÍLOHY

Příloha 1: Výsledky měření šířky v bodě A po reálném experimentu, Mosten GB 002

Číslo série	Číslo vzorku					Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4	5		
1	9,70	9,69	9,68	9,69	9,71	9,6940	0,0102
2	9,84	9,79	9,77	9,76	9,80	9,7920	0,0279
3	9,71	9,73	9,69	9,70	9,69	9,7040	0,0150
4	9,73	9,71	9,70	9,69	9,73	9,7120	0,0160
5	9,69	9,69	9,72	9,74	9,73	9,7140	0,0206
6	9,72	9,74	9,72	9,75	9,74	9,7340	0,0120
7	9,72	9,75	9,74	9,76	9,75	9,7440	0,0136
8	9,76	9,72	9,74	9,75	9,76	9,7460	0,0150
9	9,73	9,76	9,73	9,79	9,74	9,7500	0,0228
10	9,73	9,75	9,74	9,70	9,75	9,7340	0,0185
11	9,72	9,75	9,78	9,78	9,71	9,7480	0,0293
12	9,72	9,77	9,71	9,71	9,70	9,7220	0,0248
13	9,73	9,75	9,71	9,78	9,75	9,7440	0,0233
14	9,73	9,71	9,74	9,78	9,73	9,7380	0,0232
15	9,68	9,73	9,71	9,69	9,71	9,7040	0,0174

Příloha 2: Výsledky měření šířky v bodě B po reálném experimentu, Mosten GB 002

Číslo série	Číslo vzorku					Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4	5		
1	19,55	19,54	19,57	19,61	19,55	19,5640	0,0250
2	19,53	19,60	19,59	19,56	19,57	19,5700	0,0245
3	19,60	19,54	19,59	19,56	19,54	19,5660	0,0250
4	19,56	19,67	19,59	19,60	19,59	19,6020	0,0366
5	19,57	19,59	19,52	19,52	19,53	19,5460	0,0287
6	19,67	19,59	19,58	19,56	19,59	19,5980	0,0376
7	19,57	19,57	19,57	19,56	19,62	19,5780	0,0214
8	19,63	19,58	19,59	19,57	19,64	19,6020	0,0279
9	19,55	19,57	19,55	19,53	19,52	19,5440	0,0174
10	19,61	19,59	19,61	19,62	19,66	19,6180	0,0232
11	19,57	19,62	19,54	19,54	19,58	19,5700	0,0297
12	19,64	19,65	19,71	19,58	19,61	19,6380	0,0435
13	19,55	19,55	19,62	19,65	19,58	19,5900	0,0395
14	19,61	19,61	19,66	19,61	19,67	19,6320	0,0271
15	19,59	19,62	19,56	19,59	19,61	19,5940	0,0206

Příloha 3: Výsledky měření tloušťky v bodě C po reálném experimentu, Mosten GB 002

Číslo série	Číslo vzorku					Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4	5		
1	3,96	3,95	3,95	3,96	3,94	3,9520	0,0075
2	3,94	3,94	3,95	3,95	3,96	3,9480	0,0075
3	3,94	3,95	3,94	3,95	3,94	3,9440	0,0049
4	3,95	3,96	3,95	3,95	3,96	3,9540	0,0049
5	3,94	3,94	3,94	3,94	3,95	3,9420	0,0040
6	3,95	3,95	3,97	3,96	3,95	3,9560	0,0080
7	3,96	3,95	3,95	3,95	3,95	3,9520	0,0040
8	3,95	3,95	3,95	3,96	3,95	3,9520	0,0040
9	3,94	3,94	3,95	3,94	3,94	3,9420	0,0040
10	3,95	3,95	3,95	3,94	3,94	3,9460	0,0049
11	3,95	3,93	3,95	3,93	3,97	3,9460	0,0150
12	3,95	3,96	3,97	3,95	3,95	3,9560	0,0080
13	3,92	3,93	3,93	3,95	3,93	3,9320	0,0098
14	3,94	3,94	3,94	3,93	3,93	3,9368	0,0041
15	3,94	3,95	3,95	3,95	3,94	3,9460	0,0049

Příloha 4: Výsledky měření tloušťky v bodě D po reálném experimentu, Mosten GB 002

Číslo série	Číslo vzorku					Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4	5		
1	3,92	3,94	3,92	3,95	3,95	3,9360	0,0136
2	3,94	3,95	3,93	3,94	3,94	3,9400	0,0063
3	3,94	3,95	3,96	3,95	3,95	3,9500	0,0063
4	3,96	3,95	3,95	3,95	3,97	3,9560	0,0080
5	3,95	3,94	3,94	3,94	3,95	3,9440	0,0049
6	3,94	3,95	3,95	3,95	3,97	3,9520	0,0098
7	3,96	3,96	3,96	3,97	3,94	3,9580	0,0098
8	3,95	3,95	3,94	3,96	3,96	3,9520	0,0075
9	3,92	3,93	3,93	3,96	3,92	3,9320	0,0147
10	3,94	3,96	3,96	3,94	3,96	3,9520	0,0098
11	3,95	3,92	3,95	3,94	3,95	3,9420	0,0117
12	3,95	3,95	3,94	3,96	3,94	3,9480	0,0075
13	3,91	3,95	3,94	3,95	3,93	3,9360	0,0150
14	3,94	3,92	3,93	3,96	3,95	3,9400	0,0141
15	3,96	3,95	3,96	3,94	3,93	3,9480	0,0117

Příloha 5: Výsledky měření hmotnosti zkušebního tělíka po reálném experimentu, Mosten GB 002

Číslo série	Číslo vzorku					Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4	5		
1	21,8125	21,8038	21,7785	21,7605	21,7408	21,7792	0,0266
2	21,6352	21,6248	21,6300	21,6170	21,6157	21,6245	0,0075
3	21,3153	21,3103	21,3113	21,3072	21,3061	21,3100	0,0033
4	21,7746	21,7652	21,7583	21,7615	21,7539	21,7627	0,0070
5	21,3081	21,3033	21,2976	21,3068	21,2981	21,3028	0,0043
6	21,5593	21,5566	21,5562	21,5502	21,5498	21,5544	0,0038
7	21,5578	21,4941	21,4987	21,4916	21,4863	21,5057	0,0264
8	21,7593	21,7607	21,7638	21,7596	21,7575	21,7602	0,0021
9	21,2986	21,2971	21,3064	21,3010	21,2950	21,2996	0,0039
10	21,4903	21,5402	21,4896	21,4881	21,4810	21,4978	0,0214
11	21,1961	21,1424	21,1413	21,1390	21,1363	21,1510	0,0226
12	21,6606	21,6671	21,6545	21,6579	21,6651	21,6610	0,0046
13	21,0243	21,0763	21,0727	21,0722	21,0721	21,0635	0,0197
14	21,4214	21,4192	21,4233	21,4104	21,4382	21,4225	0,0090
15	21,6949	21,7476	21,7532	21,7582	21,7445	21,7397	0,0229

Příloha 6: Výsledky parametrů kvality po simulaci vstřikování, Mosten GB 218

Číslo série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
1	9,9012	19,7982	3,9669	3,9689	22,9640
2	9,8861	19,7641	3,9620	3,9632	22,7100
3	9,8769	19,7520	3,9588	3,9608	22,6470
4	9,8960	19,7981	3,9669	3,9689	22,9640
5	9,8774	19,7529	3,9588	3,9608	22,6470
6	9,8729	19,7366	3,9578	3,9593	22,5160
7	9,8738	19,7395	3,9581	3,9598	22,5310
8	9,8882	19,7709	3,9629	3,9649	22,7160
9	9,8601	19,7162	3,9530	3,9549	22,4310
10	9,8736	19,7393	3,9581	3,9598	22,5310
11	9,8468	19,6884	3,9488	3,9507	22,2710
12	9,8759	19,7420	3,9589	3,9611	22,4940
13	9,8478	19,6876	3,9487	3,9502	22,0850
14	9,8645	19,7192	3,9550	3,9566	22,5110
15	9,8726	19,7360	3,9577	3,9602	22,5050



Příloha 7: Výsledky měření šířky v bodě A po reálném experimentu, Mosten GB 218

Číslo série	Číslo vzorku				Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4		
1	9,78	9,76	9,74	9,78	9,7650	0,0166
2	9,73	9,75	9,75	9,73	9,7400	0,0100
3	9,71	9,74	9,72	9,74	9,7275	0,0130
4	9,74	9,75	9,74	9,74	9,7425	0,0043
5	9,71	9,72	9,75	9,72	9,7250	0,0150
6	9,72	9,71	9,72	9,72	9,7175	0,0043
7	9,72	9,73	9,72	9,76	9,7325	0,0164
8	9,77	9,74	9,78	9,73	9,7550	0,0206
9	9,71	9,72	9,74	9,72	9,7225	0,0109
10	9,71	9,71	9,71	9,71	9,7100	0,0000
11	9,74	9,76	9,75	9,76	9,7525	0,0083
12	9,74	9,71	9,71	9,74	9,7250	0,0150
13	9,72	9,78	9,73	9,78	9,7525	0,0277
14	9,73	9,71	9,73	9,75	9,7300	0,0141
15	9,73	9,73	9,72	9,76	9,7350	0,0150

Příloha 8: Výsledky měření šířky v bodě B po reálném experimentu, Mosten GB 218

Číslo série	Číslo vzorku				Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4		
1	19,70	19,68	19,65	19,63	19,6650	0,0269
2	19,62	19,60	19,62	19,62	19,6150	0,0087
3	19,59	19,59	19,59	19,59	19,5900	0,0000
4	19,64	19,68	19,64	19,63	19,6475	0,0192
5	19,59	19,59	19,63	19,59	19,6000	0,0173
6	19,63	19,61	19,63	19,62	19,6225	0,0083
7	19,65	19,61	19,63	19,72	19,6525	0,0415
8	19,65	19,69	19,63	19,64	19,6525	0,0228
9	19,58	19,59	19,66	19,60	19,6075	0,0311
10	19,64	19,62	19,60	19,60	19,6150	0,0166
11	19,59	19,58	19,59	19,59	19,5875	0,0043
12	19,70	19,72	19,66	19,63	19,6775	0,0349
13	19,61	19,58	19,59	19,58	19,5900	0,0122
14	19,65	19,64	19,67	19,65	19,6525	0,0109
15	19,67	19,72	19,69	19,68	19,6900	0,0187

Příloha 9: Výsledky měření tloušťky v bodě C po reálném experimentu, Mosten GB 218

Číslo série	Číslo vzorku				Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4		
1	3,98	3,98	3,97	3,98	3,9775	0,0043
2	3,97	3,96	3,96	3,97	3,9650	0,0050
3	3,96	3,96	3,96	3,97	3,9625	0,0043
4	3,98	3,98	3,98	3,98	3,9800	0,0000
5	3,97	3,96	3,96	3,97	3,9650	0,0050
6	3,96	3,97	3,96	3,96	3,9625	0,0043
7	3,98	3,97	3,98	3,98	3,9775	0,0043
8	3,98	3,97	3,97	3,98	3,9750	0,0050
9	3,97	3,97	3,97	3,98	3,9725	0,0043
10	3,96	3,97	3,98	3,97	3,9700	0,0071
11	3,98	3,96	3,97	3,97	3,9700	0,0071
12	3,98	3,97	3,98	3,98	3,9775	0,0043
13	3,96	3,98	3,98	3,98	3,9750	0,0087
14	3,96	3,97	3,97	3,98	3,9700	0,0071
15	3,98	3,98	3,98	3,99	3,9825	0,0043

Příloha 10: Výsledky měření tloušťky v bodě D po reálném experimentu, Mosten GB 218

Číslo série	Číslo vzorku				Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4		
1	3,97	3,98	3,96	3,98	3,9725	0,0083
2	3,96	3,97	3,96	3,96	3,9625	0,0043
3	3,96	3,96	3,97	3,98	3,9675	0,0083
4	3,98	3,97	3,98	3,98	3,9775	0,0043
5	3,97	3,96	3,96	3,98	3,9675	0,0083
6	3,96	3,96	3,97	3,97	3,9650	0,0050
7	3,98	3,97	3,98	3,99	3,9800	0,0071
8	3,97	3,97	3,98	3,96	3,9700	0,0071
9	3,98	3,96	3,96	3,96	3,9650	0,0087
10	3,98	3,98	3,97	3,98	3,9775	0,0043
11	3,95	3,95	3,96	3,96	3,9550	0,0050
12	3,98	3,96	3,97	3,98	3,9725	0,0083
13	3,96	3,98	3,96	3,96	3,9650	0,0087
14	3,96	3,98	3,97	3,98	3,9725	0,0083
15	3,97	3,97	3,97	3,97	3,9700	0,0000

Příloha 11: Výsledky měření hmotnosti zkušebního tělíska po reálném experimentu, Mosten GB 218

Číslo série	Číslo vzorku				Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4		
1	22,2707	22,2653	22,2872	22,3298	22,2883	0,0253
2	22,0569	21,9940	22,0127	22,0235	22,0218	0,0229
3	21,7775	21,7657	21,7632	21,7604	21,7667	0,0065
4	22,3412	22,3509	22,2711	22,3472	22,3276	0,0328
5	21,7108	21,7493	21,7467	21,7005	21,7268	0,0215
6	21,8699	21,8796	21,8507	21,8729	21,8683	0,0107
7	21,9563	21,8597	21,8964	21,8584	21,8927	0,0398
8	22,2010	22,2030	22,1567	22,1609	22,1804	0,0217
9	21,6424	21,5924	21,5705	21,7398	21,6363	0,0652
10	21,8264	21,8635	21,8733	21,8445	21,8519	0,0180
11	21,4401	21,4534	21,4678	21,4458	21,4518	0,0104
12	22,0375	22,0937	22,0537	22,1151	22,0750	0,0309
13	21,4947	21,3902	21,3948	21,4006	21,4201	0,0432
14	21,8355	21,7930	21,8976	21,7911	21,8293	0,0432
15	22,0959	22,1036	22,0237	22,1017	22,0812	0,0333

Příloha 12: Hodnoty parametrů kvality jednotlivých sérií po reálném experimentu, Mosten GB 218

Číslo série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
1	9,7650	19,6650	3,9775	3,9725	22,2883
2	9,7400	19,6150	3,9650	3,9625	22,0218
3	9,7275	19,5900	3,9625	3,9675	21,7667
4	9,7425	19,6475	3,9800	3,9775	22,3276
5	9,7250	19,6000	3,9650	3,9675	21,7268
6	9,7175	19,6225	3,9625	3,9650	21,8683
7	9,7325	19,6525	3,9775	3,9800	21,8927
8	9,7550	19,6525	3,9750	3,9700	22,1804
9	9,7225	19,6075	3,9725	3,9650	21,6363
10	9,7100	19,6150	3,9700	3,9775	21,8519
11	9,7525	19,5875	3,9700	3,9550	21,4518
12	9,7250	19,6775	3,9775	3,9725	22,0750
13	9,7525	19,5900	3,9750	3,9650	21,4201
14	9,7300	19,6525	3,9700	3,9725	21,8293
15	9,7350	19,6900	3,9825	3,9700	22,0812

Příloha 13: Přepřacované výsledky simulace procesu vstřikování, Mosten GB 218

Číslo série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
2	0,7224	0,6917	0,7308	0,6952	0,7110
3	0,5533	0,5823	0,5549	0,5668	0,6394
4	0,9044	0,9991	1,0000	1,0000	1,0000
5	0,5625	0,5904	0,5549	0,5668	0,6394
6	0,4798	0,4430	0,5000	0,4866	0,4903
7	0,4963	0,4693	0,5165	0,5134	0,5074
8	0,7610	0,7532	0,7802	0,7861	0,7179
9	0,2445	0,2586	0,2363	0,2513	0,3936
10	0,4926	0,4675	0,5165	0,5134	0,5074
11	0,0000	0,0072	0,0055	0,0267	0,2116
12	0,5349	0,4919	0,5604	0,5829	0,4653
13	0,0184	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
14	0,3254	0,2857	0,3462	0,3422	0,4846
15	0,4743	0,4376	0,4945	0,5348	0,4778

Příloha 14: Přepřacované výsledky reálného vstřikování, Mosten GB 218

Číslo série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
1	1,0000	0,7561	0,7500	0,7000	0,9566
2	0,5455	0,2683	0,1250	0,3000	0,6630
3	0,3182	0,0244	0,0000	0,5000	0,3819
4	0,5909	0,5854	0,8750	0,9000	1,0000
5	0,2727	0,1220	0,1250	0,5000	0,3380
6	0,1364	0,3415	0,0000	0,4000	0,4939
7	0,4091	0,6341	0,7500	1,0000	0,5208
8	0,8182	0,6341	0,6250	0,6000	0,8378
9	0,2273	0,1951	0,5000	0,4000	0,2382
10	0,0000	0,2683	0,3750	0,9000	0,4759
11	0,7727	0,0000	0,3750	0,0000	0,0349
12	0,2727	0,8780	0,7500	0,7000	0,7217
13	0,7727	0,0244	0,6250	0,4000	0,0000
14	0,3636	0,6341	0,3750	0,7000	0,4509
15	0,4545	1,0000	1,0000	0,6000	0,7285

Příloha 15: Výsledky výpočtů relačních koeficientu a relačních tříd po simulaci, Mosten GB 218

Číslo série	Relační koeficienty					Relační třída
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	Hmotnost, [g]	
1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
2	0,6430	0,6186	0,6500	0,6213	0,6337	0,6333
3	0,5282	0,5448	0,5291	0,5358	0,5810	0,5438
4	0,8395	0,9982	1,0000	1,0000	1,0000	0,9675
5	0,5333	0,5497	0,5291	0,5358	0,5810	0,5458
6	0,4901	0,4731	0,5000	0,4934	0,4952	0,4904
7	0,4982	0,4851	0,5084	0,5068	0,5037	0,5004
8	0,6766	0,6695	0,6947	0,7004	0,6393	0,6761
9	0,3982	0,4028	0,3957	0,4004	0,4519	0,4098
10	0,4964	0,4842	0,5084	0,5068	0,5037	0,4999
11	0,3333	0,3349	0,3346	0,3394	0,3881	0,3461
12	0,5181	0,4960	0,5322	0,5452	0,4832	0,5149
13	0,3375	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3342
14	0,4257	0,4118	0,4333	0,4319	0,4924	0,4390
15	0,4875	0,4706	0,4973	0,5180	0,4891	0,4925

Příloha 16: Výsledky výpočtů relačních koeficientu a relačních tříd po reálném experimentu, Mosten GB 218

Číslo série	Relační koeficienty					Relační třída
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	Hmotnost, [g]	
1	1,0000	0,6721	0,6667	0,6250	0,9202	0,7768
2	0,5238	0,4059	0,3636	0,4167	0,5974	0,4615
3	0,4231	0,3388	0,3333	0,5000	0,4472	0,4085
4	0,5500	0,5467	0,8000	0,8333	1,0000	0,7460
5	0,4074	0,3628	0,3636	0,5000	0,4303	0,4128
6	0,3667	0,4316	0,3333	0,4545	0,4970	0,4166
7	0,4583	0,5775	0,6667	1,0000	0,5106	0,6426
8	0,7333	0,5775	0,5714	0,5556	0,7551	0,6386
9	0,3929	0,3832	0,5000	0,4545	0,3963	0,4254
10	0,3333	0,4059	0,4444	0,8333	0,4882	0,5011
11	0,6875	0,3333	0,4444	0,3333	0,3413	0,4280
12	0,4074	0,8039	0,6667	0,6250	0,6424	0,6291
13	0,6875	0,3388	0,5714	0,4545	0,3333	0,4771
14	0,4400	0,5775	0,4444	0,6250	0,4766	0,5127
15	0,4783	1,0000	1,0000	0,5556	0,6481	0,7364

Příloha 17: Výsledky parametrů kvality po simulaci vstřikování, Mosten MA 230

Číslo série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
1	9,9199	19,8337	3,9735	3,9744	23,1120
2	9,9056	19,8024	3,9690	3,9693	22,9430
3	9,8926	19,7634	3,9643	3,9622	23,0120
4	9,9193	19,8329	3,9735	3,9742	23,0930
5	9,8921	19,7691	3,9643	3,9635	22,8840
6	9,8954	19,7884	3,9657	3,9672	22,7510
7	9,8974	19,7918	3,9661	3,9677	22,8050
8	9,9165	19,8208	3,9726	3,9722	22,9780
9	9,8791	19,7555	3,9616	3,9595	22,5130
10	9,9365	19,8558	3,9661	3,9677	22,8050
11	9,8695	19,7362	3,9563	3,9585	22,3570
12	9,9087	19,8109	3,9701	3,9707	22,9610
13	9,8706	19,7344	3,9567	3,9580	22,4790
14	9,8911	19,7758	3,9641	3,9653	22,6830
15	9,9028	19,8042	3,9682	3,9699	22,7230

Příloha 18: Výsledky měření šířky v bodě A po reálném experimentu, Mosten MA 230

Číslo série	Číslo vzorku				Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4		
1	9,73	9,70	9,74	9,70	9,7175	0,0179
2	9,70	9,71	9,70	9,70	9,7025	0,0043
3	9,70	9,70	9,71	9,72	9,7075	0,0083
4	9,73	9,72	9,74	9,72	9,7275	0,0083
5	9,73	9,74	9,72	9,74	9,7325	0,0083
6	9,72	9,69	9,71	9,70	9,7050	0,0112
7	9,70	9,69	9,70	9,75	9,7100	0,0235
8	9,72	9,72	9,73	9,73	9,7250	0,0050
9	9,76	9,74	9,71	9,70	9,7275	0,0238
10	9,69	9,68	9,69	9,68	9,6850	0,0050
11	9,70	9,70	9,71	9,70	9,7025	0,0043
12	9,73	9,72	9,71	9,72	9,7200	0,0071
13	9,67	9,67	9,69	9,67	9,6750	0,0087
14	9,70	9,71	9,71	9,73	9,7125	0,0109
15	9,72	9,73	9,72	9,70	9,7175	0,0109

Příloha 19: Výsledky měření šířky v bodě B po reálném experimentu, Mosten MA 230

Číslo série	Číslo vzorku				Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4		
1	19,60	19,61	19,62	19,60	19,6075	0,0083
2	19,60	19,60	19,60	19,62	19,6050	0,0087
3	19,60	19,61	19,62	19,60	19,6075	0,0083
4	19,60	19,63	19,65	19,65	19,6325	0,0205
5	19,63	19,63	19,65	19,64	19,6375	0,0083
6	19,63	19,63	19,62	19,62	19,6250	0,0050
7	19,58	19,58	19,59	19,58	19,5825	0,0043
8	19,62	19,60	19,58	19,75	19,6375	0,0665
9	19,59	19,60	19,59	19,58	19,5900	0,0071
10	19,59	19,59	19,58	19,60	19,5900	0,0071
11	19,60	19,60	19,57	19,60	19,5925	0,0130
12	19,61	19,61	19,59	19,61	19,6050	0,0087
13	19,52	19,55	19,54	19,52	19,5325	0,0130
14	19,61	19,63	19,62	19,66	19,6300	0,0187
15	19,60	19,62	19,64	19,62	19,6200	0,0141

Příloha 20: Výsledky měření tloušťky v bodě C po reálném experimentu, Mosten MA 230

Číslo série	Číslo vzorku				Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4		
1	3,97	3,97	3,97	3,97	3,9700	0,0000
2	3,97	3,97	3,97	3,97	3,9700	0,0000
3	3,97	3,96	3,98	3,97	3,9700	0,0071
4	3,98	3,97	3,99	3,98	3,9800	0,0071
5	3,97	3,98	3,98	3,97	3,9750	0,0050
6	3,97	3,97	3,97	3,96	3,9675	0,0043
7	3,96	3,96	3,97	3,97	3,9650	0,0050
8	3,96	3,96	3,96	3,99	3,9675	0,0130
9	3,97	3,97	3,98	3,97	3,9725	0,0043
10	3,96	3,97	3,97	3,97	3,9675	0,0043
11	3,97	3,97	3,97	3,98	3,9725	0,0043
12	3,98	3,98	3,99	3,98	3,9825	0,0043
13	3,96	3,95	3,95	3,96	3,9550	0,0050
14	3,97	3,97	3,98	3,97	3,9725	0,0043
15	3,98	3,98	3,98	3,97	3,9775	0,0043

Příloha 21: Výsledky měření tloušťky v bodě D po reálném experimentu, Mosten MA 230

Číslo série	Číslo vzorku				Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4		
1	3,95	3,96	3,96	3,96	3,9575	0,0043
2	3,96	3,96	3,97	3,97	3,9650	0,0050
3	3,97	3,96	3,97	3,98	3,9700	0,0071
4	3,99	3,99	3,99	3,99	3,9900	0,0000
5	3,97	3,97	3,97	3,97	3,9700	0,0000
6	3,97	3,96	3,96	3,97	3,9650	0,0050
7	3,97	3,97	3,97	3,97	3,9700	0,0000
8	3,96	3,96	3,97	3,98	3,9675	0,0083
9	3,97	3,98	3,97	3,97	3,9725	0,0043
10	3,96	3,97	3,97	3,97	3,9675	0,0043
11	3,97	3,98	3,98	3,97	3,9750	0,0050
12	3,97	3,98	3,98	3,98	3,9775	0,0043
13	3,96	3,96	3,96	3,95	3,9575	0,0043
14	3,97	3,98	3,97	3,97	3,9725	0,0043
15	3,97	3,97	3,98	3,98	3,9750	0,0050

Příloha 22: Výsledky měření hmotnosti zkušebního tělíska po reálném experimentu, Mosten MA 230

Číslo série	Číslo vzorku				Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4		
1	22,4618	22,4621	22,4742	22,4674	22,4664	0,0050
2	22,3180	22,2906	22,2824	22,2852	22,2941	0,0141
3	22,1504	22,1916	22,3520	22,1841	22,2195	0,0780
4	22,4940	22,4960	22,6260	22,5878	22,5510	0,0576
5	22,2568	22,2956	22,2887	22,2711	22,2781	0,0152
6	22,2365	22,1953	22,2052	22,1720	22,2023	0,0232
7	22,0106	22,0071	22,0051	22,0065	22,0073	0,0020
8	22,4430	22,4418	22,4334	22,5978	22,4790	0,0687
9	22,2535	22,2811	22,2755	22,2306	22,2602	0,0199
10	22,0046	22,0124	22,0070	21,9987	22,0057	0,0049
11	22,1547	22,1466	22,1648	22,2593	22,1814	0,0455
12	22,4945	22,4714	22,3759	22,4676	22,4524	0,0453
13	21,6196	21,5792	21,5761	21,5824	21,5893	0,0176
14	22,1714	22,2038	22,2403	22,4161	22,2579	0,0945
15	22,5245	22,5362	22,5234	22,5221	22,5266	0,0056



Příloha 23: Hodnoty parametrů kvality jednotlivých sérií po reálném experimentu, Mosten MA 230

Číslo série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
1	9,7175	19,6075	3,9700	3,9575	22,4664
2	9,7025	19,6050	3,9700	3,9650	22,2941
3	9,7075	19,6075	3,9700	3,9700	22,2195
4	9,7275	19,6325	3,9800	3,9900	22,5510
5	9,7325	19,6375	3,9750	3,9700	22,2781
6	9,7050	19,6250	3,9675	3,9650	22,2023
7	9,7100	19,5825	3,9650	3,9700	22,0073
8	9,7250	19,6375	3,9675	3,9675	22,4790
9	9,7275	19,5900	3,9725	3,9725	22,2602
10	9,6850	19,5900	3,9675	3,9675	22,0057
11	9,7025	19,5925	3,9725	3,9750	22,1814
12	9,7200	19,6050	3,9825	3,9775	22,4524
13	9,6750	19,5325	3,9550	3,9575	21,5893
14	9,7125	19,6300	3,9725	3,9725	22,2579
15	9,7175	19,6200	3,9775	3,9750	22,5266

Příloha 24: Přepočované výsledky simulace procesu vstřikování, Mosten MA 230

Číslo série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
1	0,7522	0,8180	1,0000	1,0000	1,0000
2	0,5388	0,5601	0,7384	0,6890	0,7762
3	0,3448	0,2389	0,4651	0,2561	0,8675
4	0,7433	0,8114	1,0000	0,9878	0,9748
5	0,3373	0,2858	0,4651	0,3354	0,6980
6	0,3866	0,4448	0,5465	0,5610	0,5219
7	0,4164	0,4728	0,5698	0,5915	0,5934
8	0,7015	0,7117	0,9477	0,8659	0,8225
9	0,1433	0,1738	0,3081	0,0915	0,2066
10	1,0000	1,0000	0,5698	0,5915	0,5934
11	0,0000	0,0148	0,0000	0,0305	0,0000
12	0,5851	0,6301	0,8023	0,7744	0,8000
13	0,0164	0,0000	0,0233	0,0000	0,1616
14	0,3224	0,3410	0,4535	0,4451	0,4318
15	0,4970	0,5750	0,6919	0,7256	0,4848

Příloha 25: Přepřacované výsledky reálného vstřikování, Mosten MA 230

Číslo série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
1	0,7391	0,7143	0,5455	0,0000	0,9120
2	0,4783	0,6905	0,5455	0,2308	0,7328
3	0,5652	0,7143	0,5455	0,3846	0,6553
4	0,9130	0,9524	0,9091	1,0000	1,0000
5	1,0000	1,0000	0,7273	0,3846	0,7162
6	0,5217	0,8810	0,4545	0,2308	0,6374
7	0,6087	0,4762	0,3636	0,3846	0,4347
8	0,8696	1,0000	0,4545	0,3077	0,9252
9	0,9130	0,5476	0,6364	0,4615	0,6976
10	0,1739	0,5476	0,4545	0,3077	0,4330
11	0,4783	0,5714	0,6364	0,5385	0,6157
12	0,7826	0,6905	1,0000	0,6154	0,8975
13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
14	0,6522	0,9286	0,6364	0,4615	0,6953
15	0,7391	0,8333	0,8182	0,5385	0,9746

Příloha 26: Výsledky výpočtů relačních koeficientu a relačních tříd po simulaci, Mosten MA 230

Číslo série	Relační koeficienty					Relační třída
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	Hmotnost, [g]	
1	0,6687	0,7331	1,0000	1,0000	1,0000	0,8804
2	0,5202	0,5320	0,6565	0,6165	0,6908	0,6032
3	0,4328	0,3965	0,4831	0,4020	0,7906	0,5010
4	0,6607	0,7261	1,0000	0,9762	0,9521	0,8630
5	0,4300	0,4118	0,4831	0,4293	0,6235	0,4756
6	0,4491	0,4738	0,5244	0,5325	0,5112	0,4982
7	0,4614	0,4868	0,5375	0,5503	0,5515	0,5175
8	0,6262	0,6343	0,9053	0,7885	0,7380	0,7384
9	0,3685	0,3770	0,4195	0,3550	0,3866	0,3813
10	1,0000	1,0000	0,5375	0,5503	0,5515	0,7279
11	0,3333	0,3367	0,3333	0,3402	0,3333	0,3354
12	0,5465	0,5748	0,7167	0,6891	0,7143	0,6483
13	0,3370	0,3333	0,3386	0,3333	0,3736	0,3432
14	0,4246	0,4314	0,4778	0,4740	0,4681	0,4552
15	0,4985	0,5405	0,6187	0,6457	0,4925	0,5592

Příloha 27: Výsledky výpočtů relačních koeficientu a relačních tříd po reálném experimentu, Mosten MA 230

Číslo série	Relační koeficienty					Relační třída
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	Hmotnost, [g]	
1	0,6571	0,6364	0,5238	0,3333	0,8504	0,6002
2	0,4894	0,6176	0,5238	0,3939	0,6518	0,5353
3	0,5349	0,6364	0,5238	0,4483	0,5920	0,5471
4	0,8519	0,9130	0,8462	1,0000	1,0000	0,9222
5	1,0000	1,0000	0,6471	0,4483	0,6379	0,7467
6	0,5111	0,8077	0,4783	0,3939	0,5796	0,5541
7	0,5610	0,4884	0,4400	0,4483	0,4693	0,4814
8	0,7931	1,0000	0,4783	0,4194	0,8698	0,7121
9	0,8519	0,5250	0,5789	0,4815	0,6231	0,6121
10	0,3770	0,5250	0,4783	0,4194	0,4686	0,4537
11	0,4894	0,5385	0,5789	0,5200	0,5654	0,5384
12	0,6970	0,6176	1,0000	0,5652	0,8298	0,7419
13	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333
14	0,5897	0,8750	0,5789	0,4815	0,6213	0,6293
15	0,6571	0,7500	0,7333	0,5200	0,9517	0,7224

Příloha 28: Výsledky parametrů kvality po simulaci vstřikování, Krasten PS GP 154

Číslo série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
1	9,9441	19,8864	3,9809	3,9817	27,3520
2	9,9319	19,8629	3,9776	3,9784	27,1560
3	9,9215	19,8231	3,9731	3,9703	27,0410
4	9,9436	19,8858	3,9811	3,9822	27,3530
5	9,9200	19,8265	3,9727	3,9710	26,9800
6	9,9287	19,8595	3,9761	3,9781	27,1010
7	9,9291	19,8607	3,9763	3,9782	27,1080
8	9,9424	19,8835	3,9806	3,9812	27,2290
9	9,9045	19,8036	3,9667	3,9669	26,8490
10	9,9295	19,8610	3,9767	3,9784	27,1080
11	9,8974	19,7971	3,9652	3,9662	26,7230
12	9,9413	19,8784	3,9807	3,9815	27,1850
13	9,9032	19,8020	3,9667	3,9670	26,7500
14	9,9286	19,8584	3,9762	3,9780	27,1540
15	9,9404	19,8770	3,9802	3,9813	27,2140

Příloha 29: Výsledky měření šířky v bodě A po reálném experimentu, Krasten PS GP 154

Číslo série	Číslo vzorku				Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4		
1	9,81	9,82	9,81	9,81	9,8125	0,0043
2	9,79	9,80	9,81	9,80	9,8000	0,0071
3	9,79	9,82	9,79	9,80	9,8000	0,0122
4	9,81	9,82	9,84	9,82	9,8225	0,0109
5	9,81	9,81	9,81	9,81	9,8100	0,0000
6	9,82	9,81	9,81	9,81	9,8125	0,0043
7	9,80	9,81	9,81	9,81	9,8075	0,0043
8	9,82	9,82	9,82	9,82	9,8200	0,0000
9	9,83	9,78	9,81	9,81	9,8075	0,0179
10	9,86	9,81	9,81	9,83	9,8275	0,0205
11	9,80	9,81	9,78	9,80	9,7975	0,0109
12	9,84	9,82	9,81	9,82	9,8225	0,0109
13	9,76	9,78	9,79	9,78	9,7775	0,0109
14	9,82	9,81	9,82	9,82	9,8175	0,0043
15	9,83	9,81	9,81	9,82	9,8175	0,0083

Příloha 30: Výsledky měření šířky v bodě B po reálném experimentu, Krasten PS GP 154

Číslo série	Číslo vzorku				Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4		
1	19,79	19,79	19,79	19,79	19,7900	0,0000
2	19,80	19,79	19,81	19,80	19,8000	0,0071
3	19,78	19,78	19,78	19,78	19,7800	0,0000
4	19,82	19,87	19,82	19,84	19,8375	0,0205
5	19,81	19,80	19,80	19,80	19,8025	0,0043
6	19,82	19,81	19,79	19,81	19,8075	0,0109
7	19,80	19,81	19,83	19,81	19,8125	0,0109
8	19,83	19,82	19,81	19,82	19,8200	0,0071
9	19,80	19,79	19,78	19,79	19,7900	0,0071
10	19,82	19,81	19,82	19,82	19,8175	0,0043
11	19,87	19,78	19,77	19,81	19,8075	0,0390
12	19,82	19,81	19,82	19,82	19,8175	0,0043
13	19,78	19,77	19,78	19,78	19,7775	0,0043
14	19,82	19,82	19,80	19,81	19,8125	0,0083
15	19,82	19,80	19,80	19,81	19,8075	0,0083

Příloha 31: Výsledky měření tloušťky v bodě C po reálném experimentu, Krasten PS GP 154

Číslo série	Číslo vzorku				Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4		
1	3,98	3,98	3,97	3,98	3,9775	0,0043
2	3,97	3,96	3,97	3,97	3,9675	0,0043
3	3,98	3,97	3,97	3,97	3,9725	0,0043
4	3,97	3,98	3,98	3,98	3,9775	0,0043
5	3,97	3,96	3,96	3,97	3,9650	0,0050
6	3,97	3,97	3,97	3,97	3,9700	0,0000
7	3,97	3,97	3,96	3,97	3,9675	0,0043
8	3,97	3,98	3,99	3,98	3,9800	0,0071
9	3,97	3,97	3,97	3,97	3,9700	0,0000
10	3,98	3,98	3,97	3,98	3,9775	0,0043
11	3,97	3,98	3,97	3,97	3,9725	0,0043
12	3,98	3,97	3,98	3,98	3,9775	0,0043
13	3,97	3,98	3,97	3,98	3,9750	0,0050
14	3,98	3,98	3,98	3,98	3,9800	0,0000
15	3,98	3,98	3,97	3,98	3,9775	0,0043

Příloha 32: Výsledky měření tloušťky v bodě D po reálném experimentu, Krasten PS GP 154

Číslo série	Číslo vzorku				Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4		
1	3,98	3,96	3,97	3,97	3,9700	0,0071
2	3,96	3,96	3,97	3,96	3,9625	0,0043
3	3,96	3,96	3,96	3,96	3,9600	0,0000
4	3,97	3,97	3,97	3,97	3,9700	0,0000
5	3,96	3,96	3,97	3,96	3,9625	0,0043
6	3,97	3,96	3,97	3,97	3,9675	0,0043
7	3,97	3,97	3,97	3,97	3,9700	0,0000
8	3,98	3,97	3,98	3,98	3,9775	0,0043
9	3,97	3,96	3,96	3,96	3,9625	1,1900
10	3,98	3,97	3,99	3,98	3,9800	0,0071
11	3,97	3,97	3,97	3,97	3,9700	0,0000
12	3,98	3,98	3,97	3,98	3,9775	0,0043
13	3,96	3,96	3,98	3,97	3,9675	0,0083
14	3,97	3,97	3,97	3,97	3,9700	0,0000
15	3,97	3,97	3,97	3,97	3,9700	0,0000

Příloha 33: Výsledky měření hmotnosti zkušebního tělíska po reálném experimentu, Krasten PS GP 154

Číslo série	Číslo vzorku				Průměr, [mm]	Směrodatná odchylka, [mm]
	1	2	3	4		
1	26,0920	26,0750	26,0702	26,0791	26,0791	0,0081
2	26,0159	26,0187	26,0285	26,0210	26,0210	0,0047
3	25,9387	25,9470	25,9428	25,9428	25,9428	0,0029
4	26,1422	26,1640	26,1348	26,1470	26,1470	0,0107
5	25,9515	25,9591	25,9576	25,9561	25,9561	0,0028
6	26,0506	26,0478	26,0331	26,0438	26,0438	0,0066
7	26,0184	26,0225	26,0231	26,0213	26,0213	0,0018
8	26,0828	26,1947	26,1384	26,1386	26,1386	0,0396
9	25,9736	25,9859	25,9934	25,9843	25,9843	0,0071
10	26,0300	26,0274	26,0530	26,0368	26,0368	0,0100
11	25,9953	25,9970	25,9817	25,9913	25,9913	0,0059
12	26,0885	26,0612	26,0659	26,0719	26,0719	0,0103
13	25,9748	25,9787	25,9698	25,9744	25,9744	0,0032
14	26,0808	26,0785	26,0824	26,0806	26,0806	0,0014
15	26,1116	26,1487	26,0950	26,1184	26,1184	0,0194

Příloha 34: Hodnoty parametrů kvality jednotlivých sérií po reálném experimentu, Krasten PS GP 154

Číslo série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
1	9,8125	19,7900	3,9775	3,9700	26,0791
2	9,8000	19,8000	3,9675	3,9625	26,0210
3	9,8000	19,7800	3,9725	3,9600	25,9428
4	9,8225	19,8375	3,9775	3,9700	26,1470
5	9,8100	19,8025	3,9650	3,9625	25,9561
6	9,8125	19,8075	3,9700	3,9675	26,0438
7	9,8075	19,8125	3,9675	3,9700	26,0213
8	9,8200	19,8200	3,9800	3,9775	26,1386
9	9,8075	19,7900	3,9700	3,9625	25,9843
10	9,8275	19,8175	3,9775	3,9800	26,0368
11	9,7975	19,8075	3,9725	3,9700	25,9913
12	9,8225	19,8175	3,9775	3,9775	26,0719
13	9,7775	19,7775	3,9750	3,9675	25,9744
14	9,8175	19,8125	3,9800	3,9700	26,0806
15	9,8175	19,8075	3,9775	3,9700	26,1184

Příloha 35: Přepřacované výsledky simulace procesu vstřikování, Krasten PS GP 154

Číslo série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
1	1,0000	1,0000	0,9874	0,9687	0,9984
2	0,7388	0,7368	0,7799	0,7625	0,6873
3	0,5161	0,2912	0,4969	0,2562	0,5048
4	0,9893	0,9933	1,0000	1,0000	1,0000
5	0,4839	0,3292	0,4717	0,3000	0,4079
6	0,6702	0,6988	0,6855	0,7437	0,6000
7	0,6788	0,7122	0,6981	0,7500	0,6111
8	0,9636	0,9675	0,9686	0,9375	0,8032
9	0,1520	0,0728	0,0943	0,0437	0,2000
10	0,6874	0,7156	0,7233	0,7625	0,6111
11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12	0,9400	0,9104	0,9748	0,9562	0,7333
13	0,1242	0,0549	0,0943	0,0500	0,0429
14	0,6681	0,6865	0,6918	0,7375	0,6841
15	0,9208	0,8947	0,9434	0,9437	0,7794

Příloha 36: Přepřacované výsledky reálného vstřikování, Krasten PS GP 154

Číslo série	Body měření rozměrů				Hmotnost, [g]
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	
1	0,7000	0,2083	0,8333	0,5000	0,6673
2	0,4500	0,3750	0,1667	0,1250	0,3830
3	0,4500	0,0417	0,5000	0,0000	0,0000
4	0,9000	1,0000	0,8333	0,5000	1,0000
5	0,6500	0,4167	0,0000	0,1250	0,0648
6	0,7000	0,5000	0,3333	0,3750	0,4947
7	0,6000	0,5833	0,1667	0,5000	0,3845
8	0,8500	0,7083	1,0000	0,8750	0,9590
9	0,6000	0,2083	0,3333	0,1250	0,2031
10	1,0000	0,6667	0,8333	1,0000	0,4602
11	0,4000	0,5000	0,5000	0,5000	0,2376
12	0,9000	0,6667	0,8333	0,8750	0,6320
13	0,0000	0,0000	0,6667	0,3750	0,1548
14	0,8000	0,5833	1,0000	0,5000	0,6746
15	0,8000	0,5000	0,8333	0,5000	0,8601

Příloha 37: Výsledky výpočtů relačních koeficientu a relačních tříd po simulaci, Krasten PS GP 154

Číslo série	Relační koeficienty					Relační třída
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	Hmotnost, [g]	
1	1,0000	1,0000	0,9755	0,9412	0,9968	0,9827
2	0,6568	0,6552	0,6943	0,6780	0,6152	0,6599
3	0,5082	0,4136	0,4984	0,4020	0,5024	0,4649
4	0,9790	0,9867	1,0000	1,0000	1,0000	0,9932
5	0,4921	0,4271	0,4862	0,4167	0,4578	0,4560
6	0,6026	0,6240	0,6139	0,6612	0,5556	0,6114
7	0,6089	0,6347	0,6235	0,6667	0,5625	0,6192
8	0,9321	0,9390	0,9408	0,8889	0,7175	0,8837
9	0,3709	0,3503	0,3557	0,3433	0,3846	0,3610
10	0,6153	0,6374	0,6437	0,6780	0,5625	0,6274
11	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333
12	0,8929	0,8481	0,9521	0,9195	0,6522	0,8530
13	0,3634	0,3460	0,3557	0,3448	0,3431	0,3506
14	0,6010	0,6146	0,6187	0,6557	0,6128	0,6206
15	0,8632	0,8261	0,8983	0,8989	0,6938	0,8361

Příloha 38: Výsledky výpočtů relačních koeficientu a relačních tříd po reálném experimentu, Krasten PS GP 154

Číslo série	Relační koeficienty					Relační třída
	Šířka středu v bodě A, [mm]	Šířka okraje v bodě B, [mm]	Tloušťka středu v bodě C, [mm]	Tloušťka okraje v bodě D, [mm]	Hmotnost, [g]	
1	0,6250	0,3871	0,7500	0,5000	0,6004	0,5725
2	0,4762	0,4444	0,3750	0,3636	0,4476	0,4214
3	0,4762	0,3429	0,5000	0,3333	0,3333	0,3971
4	0,8333	1,0000	0,7500	0,5000	1,0000	0,8167
5	0,5882	0,4615	0,3333	0,3636	0,3484	0,4190
6	0,6250	0,5000	0,4286	0,4444	0,4974	0,4991
7	0,5556	0,5455	0,3750	0,5000	0,4482	0,4848
8	0,7692	0,6316	1,0000	0,8000	0,9242	0,8250
9	0,5556	0,3871	0,4286	0,3636	0,3855	0,4241
10	1,0000	0,6000	0,7500	1,0000	0,4809	0,7662
11	0,4545	0,5000	0,5000	0,5000	0,3961	0,4701
12	0,8333	0,6000	0,7500	0,8000	0,5760	0,7119
13	0,3333	0,3333	0,6000	0,4444	0,3717	0,4166
14	0,7143	0,5455	1,0000	0,5000	0,6058	0,6731
15	0,7143	0,5000	0,7500	0,5000	0,7813	0,6491